

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLOS
REFORÇADOS COM FIBRAS NATURAIS (SISAL, CARAUÁ E
COCO)**

THALES GORETTI MOTTA

ORIENTADOR: MICHÉLE DAL TOÉ CASAGRANDE

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL 2 EM ENGENHARIA CIVIL

BRASÍLIA - DF: DEZEMBRO/2018

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLOS
REFORÇADOS COM FIBRAS NATURAIS (SISAL, CURAUÁ E
COCO)**

THALES GORETTI MOTTA

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.**

APROVADA POR:

**MICHÉLE DAL TOÉ CASAGRANDE, DSc. (Universidade de Brasília)
(ORIENTADOR)**

**LUIZ GUILHERME RODRIGUES DE MELLO, DS.c (Universidade de Brasília)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**ANDRESSA DE ARAUJO CARNEIRO, MS.c (Universidade Federal do Piauí)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 04 do DEZEMBRO de 2018.

FICHA CATALOGRÁFICA

MOTTA, THALES GORETTI

Estudo do comportamento mecânico de solos reforçados com fibras naturais (sisal, curauá e coco) [Distrito Federal] 1990.

xii, 44 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2018)

Monografia de Projeto Final 1 - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Reforço de solo

2. Fibras Naturais

3. Solo mole

4. Compósitos

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MOTTA, T. G. (2018). Estudo do comportamento mecânico de solos reforçados com fibras naturais. Monografia de Projeto Final 1, Publicação G.PF-001/90, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 83 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Thales Goretti Motta

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Estudo do comportamento mecânico de solos reforçados com fibras naturais (sisal, curauá e coco)

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2018

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Thales Goretti Motta

Av. Parque Águas Claras Quadra 301 Conjunto 6 Lote 3/5 ap 201

71905-720 – Brasília/DF - Brasil

*Dedico este trabalho
à minha família,
que se mostra presente e
fornece apoio em
todas as situações.*

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo estudar e apresentar o comportamento mecânico em um solo argiloso reforçado com fibras de origem natural (sisal, carauá e coco) distribuídos de forma aleatória. O programa experimental consistiu na realização de ensaios de compactação e compressão simples de compósitos em tempo zero e em outros expostos ao envelhecimento natural. Através dos ensaios realizados foi possível comparar as diferenças de comportamento do solo reforçado com fibras de 25mm e 50 mm degradadas ou não. Com base nos resultados obtidos chega-se à conclusão de que, apesar de apresentarem degradação ao serem expostas ao envelhecimento natural, as fibras melhoram o comportamento mecânico do solo puro, com ganhos relevantes de resistência.

Palavras-chave: **Solo reforçado; Fibras naturais; Compósito.**

ABSTRACT

The present work aims to study and present the mechanical behavior in a clayey soil reinforced with fibers of natural origin (sisal, carauá and coconut) randomly distributed. The experimental program consisted of simple compacting and compression tests of composites at zero time and in others exposed to natural aging. Through the tests, it was possible to compare the differences in behavior of reinforced soil with fibers of 25 mm and 50 mm degraded or not. Based on the results obtained, it is concluded that, although they presented degradation when exposed to natural aging, the fibers improve the mechanical behavior of pure soil, with significant resistance gains.

Palavras-chave: **Reinforced soil; Natural fibers; Composite.**

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Relevância e Justificativa da pesquisa	1
1.2	Objetivos	2
1.2.1	Objetivos Específicos	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	Solos Reforçados	4
2.1.1	Histórico sobre solos reforçados	4
2.2	Fibras na formação de compósitos fibrosos	5
2.2.1	Influência da inclusão de fibras nas propriedades do solo	6
2.2.2	Resistência ao cisalhamento de pico em materiais argilosos	12
2.2.3	Principais parâmetros influenciadores do comportamento do solo	13
2.3	Fibras vegetais	19
2.3.1	Fibras de Sisal	19
2.3.2	Fibra de Curauá	21
2.3.3	Fibra de Coco	22
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	24
3.1	Considerações iniciais	24
3.2	Caracterização dos materiais	24
3.2.1	Fibras utilizadas	24
3.2.2	Água	26
3.2.3	Solo	27
3.3	Preparação dos materiais	27
3.3.1	Preparação das misturais para ensaio	28
3.4	Métodos e procedimentos de ensaio	29
3.4.1	Ensaio de compactação Mini-MCV	29
3.4.2	Ensaio de compressão simples	31
3.5	Investigação da degradação das fibras submetidas ao envelhecimento natural	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
4.1	Caracterização do solo puro	37
4.2	Ensaio de compactação mini-MCV	38
4.2.1	Fibras de coco	38
4.2.2	Fibras de sisal	39
4.2.3	Fibras de curauá	40
4.2.4	Análise de resultado para o ensaio de compactação mini-MCV	41

4.3	Ensaio de Compressão Simples	44
4.3.1	Fibras de coco	44
4.3.2	Fibras de sisal.....	45
4.3.3	Fibras de curauá.....	46
4.3.4	Análise de resultado para o ensaio de compressão	47
4.4	Investigação da degradação das fibras submetidas ao envelhecimento natural	55
4.4.1	Fibras de sisal.....	58
4.4.2	Fibras de coco	59
4.4.3	Fibras de curauá.....	61
4.5	Ensaio de compressão simples complementar, com corpo de prova com altura inferior 62	
5	CONCLUSÕES	66
5.1	Peso específico aparente seco máximo e umidade ótima.....	66
5.2	Resistência ao cisalhamento de pico	67
5.3	Comprimento das fibras	67
5.4	Propagação de fissuras.....	67
5.5	Modo de ruptura	68
5.6	Degradação das fibras.....	68
6	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	70
	Referências	71

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Propriedades físicas da fibra de sisal	20
Tabela 2.2 - Características de absorção de água da fibra de sisal.....	20
Tabela 2.3 - Propriedades químicas da fibra de sisal	21
Tabela 2.4 - Propriedades mecânicas da fibra de sisal	21
Tabela 2.5 - Propriedades físicas da fibra de curauá.....	22
Tabela 2.6- Características de absorção de água da fibra de curauá	22
Tabela 2.7 - Propriedades químicas da fibra de curauá.....	22
Tabela 2.8- Propriedades mecânicas da fibra de curauá	22
Tabela 2.9 - Propriedades mecânicas da fibra de coco	23
Tabela 4.1 - Índices físicos da argila de Brasília.....	37
Tabela 4.2 Comparativos PEASM e Umidade ótima dos compósitos	43
Tabela 4.3 Comparativos do início do escoamento dos compósitos	55

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Disposição fibra/fissura idealizada (Taylor, 1994)	15
Figura 2.2 - Acréscimo de resistência em função da inclinação da fibra (Gray e Ohashi, 1983)	17
Figura 3.1- Fibras de sisal	25
Figura 3.2 - Fibras de curauá.....	25
Figura 3.3- Fibras de coco.....	26
Figura 3.4- Solo do Campo Experimental da UnB	27
Figura 3.5- Fibras cortadas.....	28
Figura 3.6- Equipamento de compactação em miniatura	30
Figura 3.7 - Equipamento para ensaio de compressão simples.....	32
Figura 3.8 – Célula de carga Solotest.....	33
Figura 3.9- Corpos em exposição.....	34
Figura 3.10- Imagem mais próxima dos corpos em exposição	35
Figura 4.1 - Curva granulométrica da argila de Brasília	37
Figura 4.2- Curva de compactação do solo puro.....	38
Figura 4.3 – Curva de compactação coco e solo puro.....	39
Figura 4.4 – Curva de compactação sisal e solo puro	40
Figura 4.5 – Curva de compactação curauá e solo puro.....	41
Figura 4.6 – Corpos de prova do ensaio de compactação mini (Coco).....	42
Figura 4.7 – Curvas de compactação	43
Figura 4.8 – Curva de tensão x deformação coco e solo puro	45
Figura 4.9 – Curva de tensão x deformação sisal e solo puro.....	46
Figura 4.10 – Curva de tensão x deformação curauá e solo puro	47
Figura 4.11 Corpo de prova de coco	49
Figura 4.12 – Corpo de prova de coco 50mm	49
Figura 4.13 – Corpo de prova de sisal 50mm	50
Figura 4.14 – Corpo de prova de sisal 25mm	Error! Bookmark not defined.
Figura 4.15 – Corpo de prova de curauá 25mm.....	50
Figura 4.16 – Corpo de prova de sisal 50mm	51
Figura 4.17 – Exemplo de fibra segurando parte do solo.....	51
Figura 4.18 – Contenção de fissura pela fibra de coco	52

Figura 4.19 – Padrão de rompimento do corpo de prova de solo puro	53
Figura 4.20 – Curva de tensão x deformação geral.....	54
Figura 4.21 – Corpos de prova no local de exposição	56
Figura 4.22 – Detalhe da exposição do corpo de sisal	57
Figura 4.23 – Um dos corpos expostos com fibra de curauá	57
Figura 4.24 – Comparação das fibras de sisal 50mm.....	58
Figura 4.25 – Comparação das fibras de sisal 25mm.....	59
Figura 4.26 – Comparação das fibras de coco 50mm	60
Figura 4.27 – Comparação das fibras de coco 25mm	60
Figura 4.28 – Comparação das fibras de curauá 50mm	61
Figura 4.29 – Comparação das fibras de curauá 25mm	62
Figura 4.30 – Comparação das fibras de sisal 50mm, de alturas diferentes	63
Figura 4.31 – Corpo de sisal 50mm após ensaio finalizado.....	63
Figura 4.32 – Corpo de sisal 50mm após ensaio.....	64
Figura 4.33 – Corpo de sisal 50mm após ensaio realizado	64

Lista de abreviaturas e siglas

ISC – Índice de Suporte Califórnia

L – Comprimento da fibra

l/d – Fator de forma

Dr – Densidade relativa

D50 – Diâmetro médio

NBR – Norma Brasileira ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

SUCS – Sistema Unificado de Classificação dos Solos

δ – Massa específica

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

IP – Índice de Plasticidade

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

Wot – Umidade Ótima

ISC – Índice de Suporte Califórnia

1 INTRODUÇÃO

1.1 Relevância e Justificativa da pesquisa

A utilização de fibras como reforço nas diversas áreas da construção civil para melhoramento de suas propriedades mecânicas é amplamente conhecida pela humanidade. Babilônicos e Chineses utilizaram, há mais de três mil anos, técnicas com fibras de origem vegetal (palhas) para o reforço de solo argiloso já com intuito de melhorar suas capacidades mecânicas (FESTUGATO, 2008).

Sendo o solo um material de grande complexidade e variabilidade, é usual que seus parâmetros não atendam as especificações de projeto prontamente. Cabe ao engenheiro buscar métodos de melhorar, ou até mesmo criar, novos materiais que atendam tanto à demanda técnica quanto à econômica.

Em caso de capacidade econômica elevada, a técnica mais utilizada é a remoção total do solo dito pobre e substituição por outro com as capacidades desejadas. Porém nem sempre essa remoção total é possível, é quando técnicas de melhoria do solo existente se veem necessárias. Entre elas as mais comuns são: compactação mecânica, estabilização por processos químicos, adição de elementos de reforço e mistura de tipos diferentes de solo, sempre com objetivo de alcançar resistência e estabilidade adequadas ao projeto.

Tratando do reforço do solo com fibras, existem dois grandes grupos desse tipo de material que são utilizados atualmente: naturais e sintéticos. As fibras sintéticas são originárias de processos industriais, apresentando, portanto, características constantes e bem definidas, boa resistência a ação do tempo, mas com problemas ambientais sérios, uma vez que possuem origem petroquímica. As fibras naturais (em sua maioria de origem vegetal) possuem maior variabilidade de suas características físicas e mais sujeitas à degradação biológica, mas ainda assim apresentam bons resultados e podem ser uma solução de menor custo, além de mais sustentável e menor gasto de energia para sua produção.

A inclusão de fibras como elemento de reforço ao solo tem sido objeto de estudo de diversos pesquisadores nos séculos XX e XXI, nas mais diversas áreas de aplicação, desde estabilização até estruturas de contenção e pavimentos. TOLEDO (1997a) realizou pesquisa com compósitos contendo fibras naturais, com caracterização experimental e ensaios de impermeabilização em

fibras de sisal e coco. CASAGRANDE (2001) Estudou o comportamento de um solo reforçado com fibras de prolipileno visando o uso em fundações superficiais.

O Brasil é notoriamente um grande produtor de elementos naturais devido à extensão do seu território e clima favorável. Isso torna os produtos desse tipo em algo de fácil acesso e elevada produção, fazendo com que os custos destes sejam atrativos ao mercado. A fibra de sisal, por exemplo, mostra-se promissora no desenvolvimento de materiais compósitos por apresentar baixo custo, disponibilidade e boas propriedades mecânicas, além de que o Brasil é o maior produtor global desta fibra (FAO, 2004). Pode-se citar também a fibra de coco, que também possuem boas características para uso em compósitos, além de que tais fibras representam 85% do peso do fruto, tornando seu uso de grande valor ambiental (EMBRAPA, 2012).

Neste contexto de vantagens econômicas, técnicas e ambientais, o presente trabalho tem como objetivo verificar o comportamento mecânico de fibras naturais (sisal, carauá e coco) em solo argiloso com vistas de possíveis aplicações em obras de engenharia civil.

1.2 Objetivos

O objetivo principal desta pesquisa é avaliar o comportamento mecânico de um solo argiloso reforçado com diferentes fibras naturais (sisal, carauá e coco) em diferentes teores e comprimentos afim de que seja possível obter resultados que superem os de solo puro.

1.2.1 Objetivos Específicos

O trabalho está sendo realizado com solo argiloso, de grande ocorrência no Distrito Federal, com intuito de:

- Analisar a influência do comprimento da fibra nos valores de resistência através de ensaios laboratoriais adequados, como compressão simples e CBR;
- Avaliar a influência da inclusão de fibras através de comparação com solo puro;
- Estudar a influência do teor de fibras nos valores de resistência;

- Caracterizar vantagens e desvantagens mecânicas de cada um dos tipos de fibras entre si e contra o solo puro;
- Verificar possíveis perdas em capacidade mecânica devido à degradação ambiental das fibras em comparação a fibras recém inseridas no compósito.
- Estudar a influência do tipo de fibra natural no comportamento mecânico do compósito.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Solos Reforçados

A melhoria dos solos está relacionada ao tratamento através de processos químicos, enquanto o termo reforço está associado à utilização de inclusões em aterros ou taludes (CASAGRANDE, 2005). O objetivo dessas melhorias está relacionado ao aumento de resistência do solo original e a diminuição da sua compressibilidade e permeabilidade.

Como o material solo pode apresentar propriedades geotécnicas diferentes daquelas exigidas no projeto de obra de construção civil, opta-se pelo processo de reforço desse solo local, melhorando propriedades necessárias e dispensando custos com bota-fora e possíveis transportes de material (PESSOA, 2004).

O material dito compósito é a combinação de dois ou mais materiais com propriedades que não possuiriam caso empregados isoladamente (BUDINSKI, 1996). São esses constituídos de uma fase chamada matriz (concreto, silicone, solo, etc.) e por pelo menos um elemento de reforço (aço, fibras, isopor, etc.), sendo desenvolvidos para otimizar e complementar as propriedades inerentes de cada um deles.

2.1.1 Histórico sobre solos reforçados

A técnica de melhoramento do solo é tida como a mais antiga dentre as técnicas e métodos executivos utilizados comumente na construção civil (IMPE, 1989).

A técnica de melhoramento do solo é tida como a mais antiga dentre as técnicas e métodos executivos utilizados comumente na construção civil (IMPE, 1989). A melhoria do solo existente no local possui um sentido de praticidade e economia. Esses fatores já foram percebidos desde a antiguidade, mesmo que as características do solo local não sejam perfeitas ao uso. Portanto, foram utilizadas adições, principalmente de elementos naturais, com o objetivo de melhoramento de propriedades mecânicas e obtenção de estruturas duráveis e resistentes (SOTOMAYOR, 2014).

Nas estradas do Império Romano, um dos elementos responsáveis pela sua grandiosidade, apresentam vestígios do uso de tecidos e peles utilizados como reforço. Outras grandes

construções da antiguidade também apresentam o uso dessa técnica, como é o caso da Grande Muralha da China (SOTOMAYOR, 2014).

É possível ainda ir mais longe na linha do tempo. SILVA (2009) apresenta que, por volta de 5000 anos atrás, a construção dos Zigurats pelos babilônios possuíam reforço de cordas com 0.05 m de diâmetro, inseridas perpendicularmente ao talude e com espaçamento regular horizontal e vertical.

O resgate das técnicas supracitadas ocorreu apenas no meio do século XX, com a publicação de artigos visando compreender e avaliar o efeito de raízes de plantas no cisalhamento dos solos. A contribuição das raízes para estabilização de taludes e aumento de resistência ao cisalhamento foi observada por ENDO; TSURUTA (1969) e KAUL (1965). Com o resultado dessas pesquisas foram desenvolvidas técnicas que agissem da mesma maneira. VIDAL (1969) patenteou a famosa técnica de "Terra Armada", onde o reforço é alcançado pela introdução de tiras metálicas e painéis de concreto que constituíam o maciço.

Solos reforçados com fibras estão sendo usados em estabilização de ruptura de taludes, redução de fissuras e reforço de sub-bases em obras rodoviárias. O uso de fibras em engenharia é viável em campos como: fundação de solos, muros de contenção, aterros ferroviários e rodoviários além de proteção de encostas (HEJAZI, 2012).

2.2 Fibras na formação de compósitos fibrosos

Os ganhos em um material compósito pela inclusão de fibras são diversos, e não necessariamente o aumento da resistência está entre os ganhos buscados. MARTINS (2014) mostra que em um projeto de material resistente à eventos sísmicos a ênfase está no aumento da capacidade de absorção de energia assim como na queda da resistência pós-pico.

Uma grande quantidade de autores relatou mudanças no comportamento mecânico dos solos reforçados com fibras. Estas mudanças estão relacionadas aos mais diversos fatores, dentre eles: compactação, deformabilidade, resistência ao cisalhamento, modo de ruptura, variação volumétrica, rigidez inicial e condutividade hidráulica. Na sequência serão apresentados trabalhos relacionados a essas alterações e suas consequências.

2.2.1 Influência da inclusão de fibras nas propriedades do solo

Compactação

A adição de fibras de polipropileno e sua influência na compactação de um cascalho com areia foi estudada por HOARE (1997), onde foi observado que as fibras inseridas fornecem certa resistência à compactação, resultando em maiores porosidades da mistura para mesma energia de compactação.

AL-WAHAB; AL-QURNA (1995) realizaram a avaliação dos efeitos de inclusão de teores de fibras na curva de compactação de uma argila. Como resultado foi demonstrado um decréscimo de densidade e um acréscimo na umidade ótima para adição de 2% de fibra, considerando-os não significantes.

BUENO et al. (1996) observaram o mesmo comportamento com relação à umidade para um solo arenoso, ao contrário do solo argiloso, onde não foi observada nenhuma alteração na umidade ótima. Em ambos os casos, a densidade máxima não sofreu alterações com a inclusão de fibras.

LEOCADIO (2005) observou que o aumento do teor de fibras vegetais adicionado ao solo aumentou a densidade até certo limite e depois a diminuiu mantendo o valor próximo ao do solo natural e evidenciou também o aumento da umidade ótima.

Diversos autores não relataram terem encontrado qualquer alteração significativa pela inclusão das fibras (MAHER; HO 1994; ULRICH 1997; CASAGRANDE 2001; HEINECK 2002).

DIAB et al. (2018) avaliou o efeito de dois métodos de compactação (de impacto e de amassamento) no comportamento mecânico não drenado de argilas reforçadas com fibras. Como resultado foi percebido que a melhoria na resistência é dependente do método de compactação, com amostras preparadas usando compactação de impacto (método empregado em laboratório) produzindo melhorias até três vezes maiores do que amostras preparadas por amassamento (método empregado em campo). Tal distinção no comportamento foi ser atribuída às diferenças nas distribuições de orientação das fibras entre as amostras que foram compactados por impacto e amassamento.

Resistência ao cisalhamento de pico

Diversos autores relataram o aumento na resistência pelo acréscimo de fibras (Maher e Ho (1994); Bueno (1996); Diab (2018); Heineck (2002)).

A adição de fibras aumenta a resistência ao cisalhamento do solo, mas dependendo do tipo de fibra o aumento será no ângulo de atrito e coesão (PLE, 2009). Diversos pesquisadores apresentaram que a inclusão de fibras e o aumento do teor de fibras aumenta o ângulo de atrito e o intercepto coesivo (Hoare (1997); Bueno (1996)).

Vários autores relataram apenas o aumento do ângulo de atrito com inclusão das fibras (AL-Wahab e Al-Qurna (1995); Casagrande (2001); Teodoro (1999); Heineck (2002)). Porém, outros autores relataram apenas o aumento do intercepto coesivo pela inclusão das fibras ((BUENO, 1996); Casagrande (2001); Heineck (2002); Leocadio (2005)).

Para Maher e Ho (1994) a inclusão de fibras tem grande influência nas propriedades de argilas caulinísticas. O aumento do teor das fibras aumenta a resistência à tração e à compressão, porém, o aumento do comprimento das fibras diminui a contribuição destas para a resistência, tanto à compressão como à tração. Bueno (1996) observou que os solos coesivos são menos sensíveis ao aumento do comprimento das fibras. Análises baseadas em ensaios triaxiais revelaram um acréscimo no ângulo de atrito com a adição do reforço, sendo este maior quanto maior for o teor de fibras.

Casagrande (2001) e Casagrande e Consoli (2002) avaliaram o comportamento de areia siltosa reforçada com fibras de polipropileno. Seus resultados mostram que as fibras passaram a contribuir de forma mais significativa para o acréscimo da resistência a partir de 2.5% de deformação axial.

A adição de fibras de polipropileno nas matrizes de areia e bentonita aumenta tanto os parâmetros de resistência ao cisalhamento de pico, como também a resistência pós-pico após grandes deslocamentos horizontais, sem quedas significativas de resistência pós-pico no caso da matriz arenosa. Para a matriz de alta plasticidade e altos índices de vazios, o acréscimo de resistência tende a reduzir com o aumento das deformações cisalhantes. Por outro lado, o efeito da inclusão de fibras foi mais evidente para baixas tensões efetivas médias iniciais, menores diâmetros, maiores comprimentos e maiores teores de fibras, sendo seu efeito mais pronunciado para misturas mais densas (CASAGRANDE, 2005).

Uma bilinearidade na envoltória de ruptura de uma areia siltosa reforçada com fibras foi percebida por Heineck (2002). A parte inicial da envoltória possui um intercepto coesivo praticamente inexistente e um ângulo de atrito que supera o dobro do valor correspondente ao solo sem reforço. Já na segunda parte da envoltória, acima da tensão confinante crítica, o ângulo de atrito é semelhante ao do solo sem reforço, entretanto, houve um acréscimo razoável do intercepto coesivo.

Curcio (2008) diz que o comportamento do material compósito parece ser inicialmente controlado unicamente pela matriz de solo, à medida que crescem as deformações, o comportamento passa a ser controlado pela matriz e pelas fibras.

Resistência ao cisalhamento pós-pico

Praticamente todos os trabalhos que analisaram o comportamento de solos reforçados em termos da resistência concluíram que a adição de fibras reduz a queda da resistência pós-pico, sendo essa uma característica importante no resultado da inclusão das fibras (Leocadio (2005); Casagrande (2005); Festugato (2008)).

Santiago (2011) e Casagrande e Consoli (2002) relataram um crescimento constante da resistência com o aumento da deformação axial, caracterizando um comportamento elastoplástico de enrijecimento.

Comportamento carga-recalque

Ensaio de provas de carga em placa sobre espessas camadas de areia compactada, reforçada e não reforçada com fibras foram executados por Casagrande (2005). O comportamento carga-recalque do solo arenoso foi significativamente influenciado pela adição de fibras, aumentando a capacidade de suporte deste e alterando os mecanismos de ruptura.

Girardello (2010) avaliou o comportamento mecânico de uma areia não saturada, com e sem reforço de fibras de polipropileno, através de ensaios de placa em densidade relativa de 50% e 90%. O melhor resultado foi obtido para o ensaio de placa realizado na maior densidade relativa.

Propagação de fissuras

Taylor (1994) acredita que as fibras não impedem a formação de fissuras no compósito, mas são capazes de aumentar a resistência à tração, a deformação de ruptura e a tenacidade pelo

controle da abertura e do espaçamento e com isso o controle da propagação das fissuras. As fibras que atravessam as fissuras mantêm as interfaces das fissuras juntas, beneficiando as propriedades mecânicas no estado pós-fissuração pelo aumento da ductilidade.

Teodoro (1999) confeccionou painéis com solo de matriz argilosa reforçados com fibras de polipropileno, com a finalidade de estudar o padrão de fissuramento deste material quando submetido a variações térmicas. Foi concluído que efeito da inclusão de fibras nos painéis foi o de reduzir a dimensão das trincas sem, no entanto, evitar o fissuramento.

Ple (2009) avaliou o desempenho mecânico da adição de fibras como reforço em uma argila com três tipos de fibras: fibras orgânicas de sisal, fibras de polipropileno sintéticas e uma mistura fibra metálica/pneu em pó, com razão de forma igual a 300. As fissuras se formaram mais rápidas nas amostras com fibras do que em amostras sem fibras, mas a propagação das fissuras foi reduzida devido à presença das fibras, reduzindo os danos, evitando o aparecimento de uma banda de cisalhamento e aumentando a capacidade da argila de suportar carga ou a sobrecarga.

Para Casagrande (2005) as fibras inibem a amplitude das fissuras associadas à ruptura do compósito. Este fato leva a um aumento nas áreas sob as curvas tensão vs. deformação. Esta propriedade é comumente referida como tenacidade, e representa o trabalho das fissuras ou a capacidade de absorção de energia do compósito.

Deformabilidade

McGown, Andrawes e Mercer (1988) observaram através de um ensaio de placa de pequenas dimensões, uma grande parcela de deformação recuperada com o descarregamento, referente a 20% da deformação total imposta.

McGown, Andrawes e Mercer (1988), para areias e Maher e Ho (1994) e Nataraj (1996), para argilas, relataram um aumento no módulo de deformação, tanto maior quanto maior o teor de fibras. Contrariamente, Consoli, Prietto e Ulbrich (1999) obtiveram redução do módulo com a inclusão de fibras, para areias cimentadas e não cimentadas.

Para Heineck (2002) a taxa de deformação onde as fibras passam a contribuir de forma mais significativa para o acréscimo de resistência ao cisalhamento depende do tipo de matriz.

Resultados de módulo de resiliência realizados por Donato (2004) permitiram verificar a grande importância da inclusão de fibras sobre a deformabilidade resiliente, onde o módulo é reduzido em 65%.

Consoli, Casagrande e Coop (2007) observaram que quanto maior é a deformação cisalhante no ensaios, maior vai ser a quantidade de fibras rompidas, isto confere a ideia de que as fibras se alongam até que as deformações do ensaio superam a deformação de ruptura das fibras, porém as fibras sofrem deformações plásticas antes de romper.

Modo de ruptura

O aumento da ductilidade do solo com a adição de fibras é uma observação feita em caráter unânime pelos vários autores que avaliaram este parâmetro (Hoare (1997); McGown, Andrawes e Mercer (1988); Maher e Ho (1994); Nataraj (1996); Casagrande (2005)).

Para Feuerharmel (2000), a forma de ruptura do solo é grandemente alterada pela inclusão de fibras de polipropileno, reduzindo a fragilidade dos solos. A amplitude dessas alterações depende fundamentalmente de uma boa adesão solo-fibra, que pode ser atingida pela ação de um agente cimentante, formando uma estrutura cimentada bastante resistente ou por uma combinação apropriada dos fatores comprimento das fibras e tensões efetivas médias normais atuantes.

Donato (2004) verificou uma significativa mudança no modo de ruptura, onde todas as amostras cimentadas não reforçadas estudadas exibiram um comportamento frágil na ruptura, enquanto que as amostras reforçadas com 0,5% de fibras de polipropileno apresentaram uma fragilidade menos pronunciada, mudando o comportamento de frágil para dúctil.

Mirzababaei (2013) avaliou o efeito de dois tipos de fibras oriundas de resíduos de carpetes na resistência não confinada de dois solos argilosos. Os padrões de ruptura das amostras de solo não reforçadas são evidentes planos de cisalhamento quase verticais. Com um aumento no teor de fibra o padrão de ruptura é gradualmente transformado para um abaulamento plástico com redes de pequenas fissuras sem um plano de cisalhamento aparente na ruptura. As amostras de solo não reforçado mostram um comportamento frágil e rompem com uma deformação axial muito pequena (isto é, menos de 1%), enquanto que amostras com 5% de teor de fibra rompem com uma deformação axial relativamente maior (isto é, 15% ou mais com comportamento de enrijecimento e dúctil).

Variação volumétrica

A adição de fibras aumenta as deformações volumétricas de compressão na ruptura, segundo relatos de Stauffer e Holtz (1995), sendo este aumento mais pronunciado para uma areia uniforme do que para uma areia bem graduada, ambas com mesmo diâmetro médio (D50).

Bueno (1996) observou o aumento da compressibilidade do solo com a inclusão de fibras. Segundo Shewbridge e Sitar (1990), a deformação volumétrica aumenta com o acréscimo da quantidade de reforço, porém, de forma não linear, similar ao observado por Nataraj (1996).

As fibras constituem uma estrutura entrelaçada que impõe uma resistência às deformações radiais na amostra, aumentando assim as deformações de compressão do solo. Este efeito depende da adesão entre o solo e as fibras, sendo que para a areia, onde esta adesão é inferior aos demais solos, não se observa alterações significativas na variação volumétrica (FEUERHARMEL, 2000).

Rigidez inicial

McGown, Andrawes e Mercer (1988), para areias, Maher e Ho (1994) e Nataraj (1996) para argilas relataram aumento no módulo de deformação, tanto maior quanto maior o teor de fibras. Contrariamente, Consoli, Prietto e Ulbrich (1999) e Casagrande (2001) obtiveram redução do módulo com a inclusão de fibras.

Para Feuerharmel (2000) a intensidade das alterações no módulo de elasticidade depende também do tipo e das características de cada solo. Estudos realizados pelo autor em argila e areia siltosa reforçada com fibras de polipropileno indicaram grande redução do módulo, enquanto que, os resultados de ensaios realizados em areia reforçada mostraram pequenas alterações no módulo.

O efeito do reforço fibroso na rigidez inicial do compósito depende das características do mesmo, reforça Ple (2009).

Condutividade hidráulica e outras propriedades

Maher e Ho (1994) estudaram as propriedades hidráulicas de um compósito caulinita/fibra através de ensaios de condutividade hidráulica. Observou-se que a adição de reforços fibrosos aumentou a permeabilidade da argila estudada, sendo mais pronunciada para maiores teores de fibra.

Bueno (1996) relatou uma redução da permeabilidade de uma ordem de grandeza, causada pela adição de fibras a solos granulares.

Nataraj (1996) apresenta os resultados de uma série de ensaios de laboratório em um solo arenoso e outro argiloso reforçados com fibras de polipropileno distribuídas aleatoriamente. Tanto o solo arenoso quanto o argiloso apresentaram valores de CBR maiores com a inclusão das fibras.

Feuerharmel (2000) observa que são obtidos valores de condutividade hidráulica bem mais elevados no momento em que são adicionados fibras e cimento ao material argiloso, pois com a flocculação das partículas de argila, estas, que antes aderiam às fibras, passam a se aglomerar ao redor de partículas de cimento, propiciando a segregação das fibras.

Leocadio (2005) também realizou ensaio CBR em amostras de solo reforçados com fibras vegetais. Observou que o valor do CBR aumentou com o aumento do teor e do comprimento até um certo valor e depois diminuiu. O aumento do teor de fibra aumentou a expansão significativamente, o que justifica a perda da capacidade de suporte.

2.2.2 Resistência ao cisalhamento de pico em materiais argilosos

Segundo (MAHER; HO, 1994), inclusão de fibras tem uma influência significativa nas propriedades mecânicas de argilas cauliníticas. Através de uma série de ensaios de compressão não confinada e diametral, os autores observaram um aumento do pico de resistência à compressão e à tração, assim como o aumento da ductilidade do material. Os mesmos autores constataram que o aumento da quantidade de fibras aumenta a resistência à tração e à compressão, porém, o aumento do comprimento das fibras diminui a contribuição destas para a resistência, tanto à compressão como à tração (MAHER; HO, 1994). A umidade do solo no momento da compactação também afeta essas relações, sendo elas mais expressivas para menores umidades, como foi observado por Nataraj (1996).

AL-Wahab e Al-Qurna (1995), estudando uma argila siltosa e buscando maximizar os benefícios em termos de resistência, trabalhabilidade e homogeneidade, estabeleceram uma quantidade ótima de fibra, correspondente ao ponto de maior taxa de acréscimo de resistência não confinada com a adição de fibras.

Estudos comparativos entre um material granular e um coesivo mostraram que os solos coesivos são menos sensíveis ao aumento do comprimento das fibras. Análises baseadas em ensaios triaxiais revelaram um acréscimo no ângulo de atrito com a adição do reforço, sendo este maior quanto maior for a quantidade de fibras (BUENO, 1996).

Com relação à coesão se chegou a um consenso de que esta é acrescida pela inclusão de fibras (Bueno (1996); Nataraj (1996); Teodoro (1999)). Há uma grande taxa de acréscimo de resistência com a deformação, mesmo para níveis elevados de deformação axial (20%) (FEUERHARMEL, 2000).

2.2.3 Principais parâmetros influenciadores do comportamento do solo

Comprimento da fibra (L)

Quanto maior for o comprimento das fibras, menor será a possibilidade delas serem arrancadas. Para uma dada tensão de cisalhamento superficial aplicada à fibra, esta será melhor utilizada se o seu comprimento for suficientemente capaz de permitir que a tensão cisalhante desenvolva uma tensão trativa igual à sua resistência à tração.

Gray e Ohashi (1983), Heineck (2002) e Vendruscolo (2003) observaram que existe um comprimento ótimo de fibra que confere a maior resistência.

O aumento da resistência com o aumento do comprimento da fibra provavelmente ocorre devido ao fato das fibras de maior comprimento apresentarem uma ancoragem maior dentro da amostra (CASAGRANDE, 2005).

Teodoro (1999) observou um aumento na resistência de uma areia siltosa reforçada com o aumento do comprimento das fibras de polipropileno de 0 para 30mm, comportamento este distinto do solo argiloso, que apresentou um máximo de resistência para fibras de 15mm.

Para um mesmo teor de reforço, fibras mais curtas são mais numerosas dentro da matriz e existe uma maior possibilidade de elas estarem presentes na superfície de ruptura contribuindo para o aumento da resistência. Porém, após a ruptura, as fibras mais curtas são arrancadas mais facilmente, o que denota a importância de fibras mais longas quando se deseja melhorar a ductilidade e a capacidade de absorção de energia (MAHER; HO, 1994).

Casagrande (2005) analisou o comprimento final das fibras após ensaios de *ring shear* e observou que estas tendem a sofrer grandes deformações plásticas de tração, independente do comprimento inicial, sendo solicitadas sucessivamente após estágios de alongamento, em primeira instância, e consequente ruptura ao sofrerem deslocamentos maiores.

Diâmetro da fibra (D)

Para Vendruscolo (2003) o aumento do diâmetro (título) das fibras resulta em um decréscimo da tensão de ruptura. Isto ocorre porque com o aumento do título das fibras diminui a quantidade de fibras na matriz, já que se mantém sempre constante o peso de fibras que é adicionado ao material.

Casagrande (2005) concluiu que as fibras de menor diâmetro proporcionam uma melhor interação solo-fibra e mobilização sucessiva destas, atuando positivamente na melhora do comportamento resistente do material.

Fator de forma (L/D)

Taylor (1994) apresentam um equacionamento do equilíbrio de forças idealizado no momento em que a fibra é solicitada no compósito, como demonstra a Figura 1 a seguir.

Torna-se evidente a importância não apenas do comprimento da fibra, mas também do diâmetro desta. A relação l/d (comprimento/diâmetro) ou fator de forma, como é conhecido, é proporcional ao quociente entre a resistência à tração da fibra (F_t) e a resistência da aderência fibra/matriz (F_a). Se a fibra tem uma alta resistência à tração, como por exemplo, fibra de aço, então, ou a resistência de aderência necessária deverá ser alta para impedir o arrancamento antes que a resistência à tração seja totalmente mobilizada, ou fibras de alta relação l/d deverão ser utilizadas.

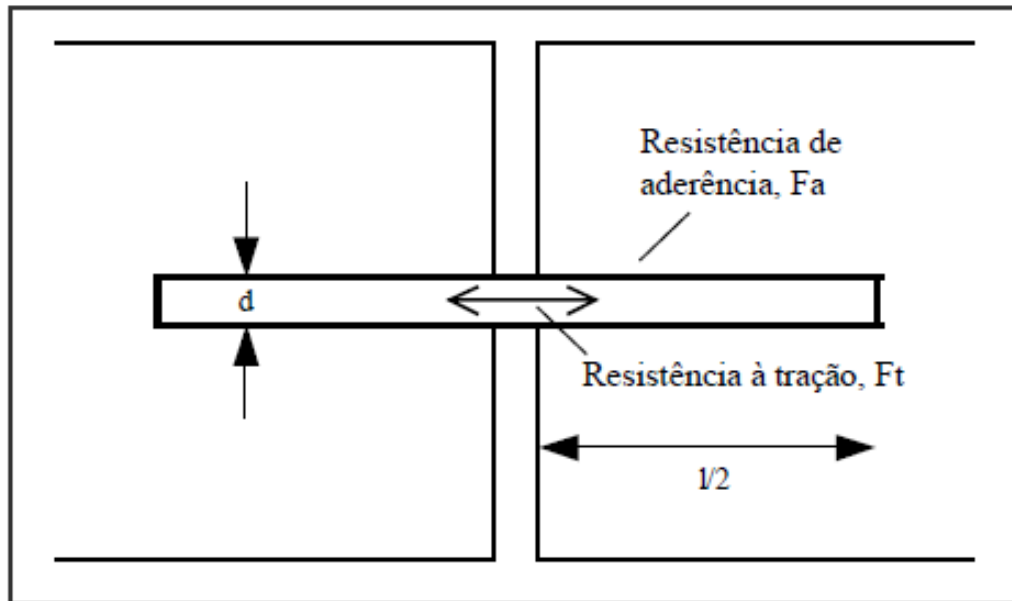


Figura 2.1 - Disposição fibra/fissura idealizada (Taylor, 1994)

$$\frac{\pi d^2}{4} Ft = \pi d \frac{l}{2} Fa \quad (2.1)$$

$$\frac{l}{d} = \frac{Ft}{2Fa} \quad (2.2)$$

Festugato (2008) analisou o comportamento mecânico de um solo (areia fina) reforçado com fibras de polipropileno de distintos índices de forma. O autor conclui que os reforços proporcionam ao solo um comportamento de enrijecimento (hardening), que passa a ser mais pronunciado a partir de um dado valor de índice de forma das fibras (em torno de 300).

Teor de fibra

Gray e Ohashi (1983), McGown, Andrawes e Mercer (1988) e Vendruscolo (2003) verificaram que o aumento da resistência ao cisalhamento com o aumento do teor de fibra é observado até um certo limite. Em outras palavras, existe um teor ótimo de fibra que confere a melhor resistência.

Para Gray e Ohashi (1983) e Maher e Ho (1994) aumento do teor de fibra provoca aumento a capacidade de absorção de energia de deformação.

Orientação das fibras

A realização de ensaios de cisalhamento por Gray e Ohashi (1983) observou-se que a inclinação de 60° em relação ao plano de ruptura representa a maior contribuição em termos de resistência e a inclinação de 120° representa a redução da resistência ao cisalhamento.

Para Johnston (1994) orientação e distribuição das fibras na matriz tem grande influência. A orientação de uma fibra com respeito ao plano de ruptura implica nas possibilidades que esta tem de contribuir com a transferência de cargas. Uma fibra que se posiciona paralela ao plano de ruptura não tem efeito, por outro lado, uma fibra que se posiciona perpendicular a este plano contribui integralmente com sua capacidade de resistir à tração.

O emprego de fibras discretas aleatoriamente distribuídas possui duas grandes vantagens em relação aos solos reforçados com inclusões orientadas, contínuas ou não: minimiza o surgimento de qualquer tipo de anisotropia e não induz planos preferenciais de fraqueza (MAHER; GRAY, 1983). A simplicidade de incorporação das fibras na matriz, já que podem ser adicionadas da mesma maneira que o cimento, a cal e outros aditivos estabilizantes também se apresenta como vantagem.

MAHER; GRAY (1989) salientam que uma massa de solo reforçada com fibras discretas distribuídas aleatoriamente utiliza processos tradicionais de mistura do solo estabilizado com cimento, cal ou outro aditivo. O mesmo pode-se dizer para o processo de compactação. Uma das principais vantagens de fibras distribuídas aleatoriamente é a manutenção da resistência isotrópica e a ausência de planos de fraqueza que podem ser desenvolvidos em sistemas de reforço orientado. No trabalho desses autores foi analisada a influência de diversos parâmetros das fibras e dos solos sobre o comportamento tensão-deformação das misturas. Os autores verificaram a existência de uma tensão de confinamento crítica, onde o aumento da relação l/d resulta na redução desta tensão de confinamento crítica e torna mais efetivo a contribuição da fibra no aumento da resistência ao cisalhamento, porém, o crescimento da resistência ao cisalhamento com o aumento do teor de fibra é observado até um certo limite.

Gray e Ohashi (1989) propuseram um modelo teórico para prever o comportamento de uma areia reforçada com fibras. Ensaios de cisalhamento direto foram executados com areia, nos estados fofo e denso, reforçada com fibras naturais, sintéticas e metálicas. Os resultados mostraram que a inclusão da fibra aumentou a resistência ao cisalhamento de pico e reduziu a queda pós-pico. Foi possível observar a existência de uma tensão de confinamento crítica onde, abaixo desta, as fibras são arrancadas e, acima desta, as fibras são alongadas. As fibras com

módulo baixo comportaram-se como uma inclusão extensível, ou seja, não romperam durante o ensaio. O aumento do comprimento das fibras resultou num aumento da resistência, porém, esse aumento é verificado até um certo limite, a partir do qual, este efeito não é mais observado.

A orientação das fibras com relação à superfície de cisalhamento também é considerada no modelo. Na figura a seguir são apresentados resultados de ensaios de cisalhamento direto realizados pelos autores mencionados anteriormente. Como se pode observar, a inclinação de 60° em relação ao plano de ruptura representa a maior contribuição em termos de resistência e a inclinação de 120° representa a redução da resistência ao cisalhamento.

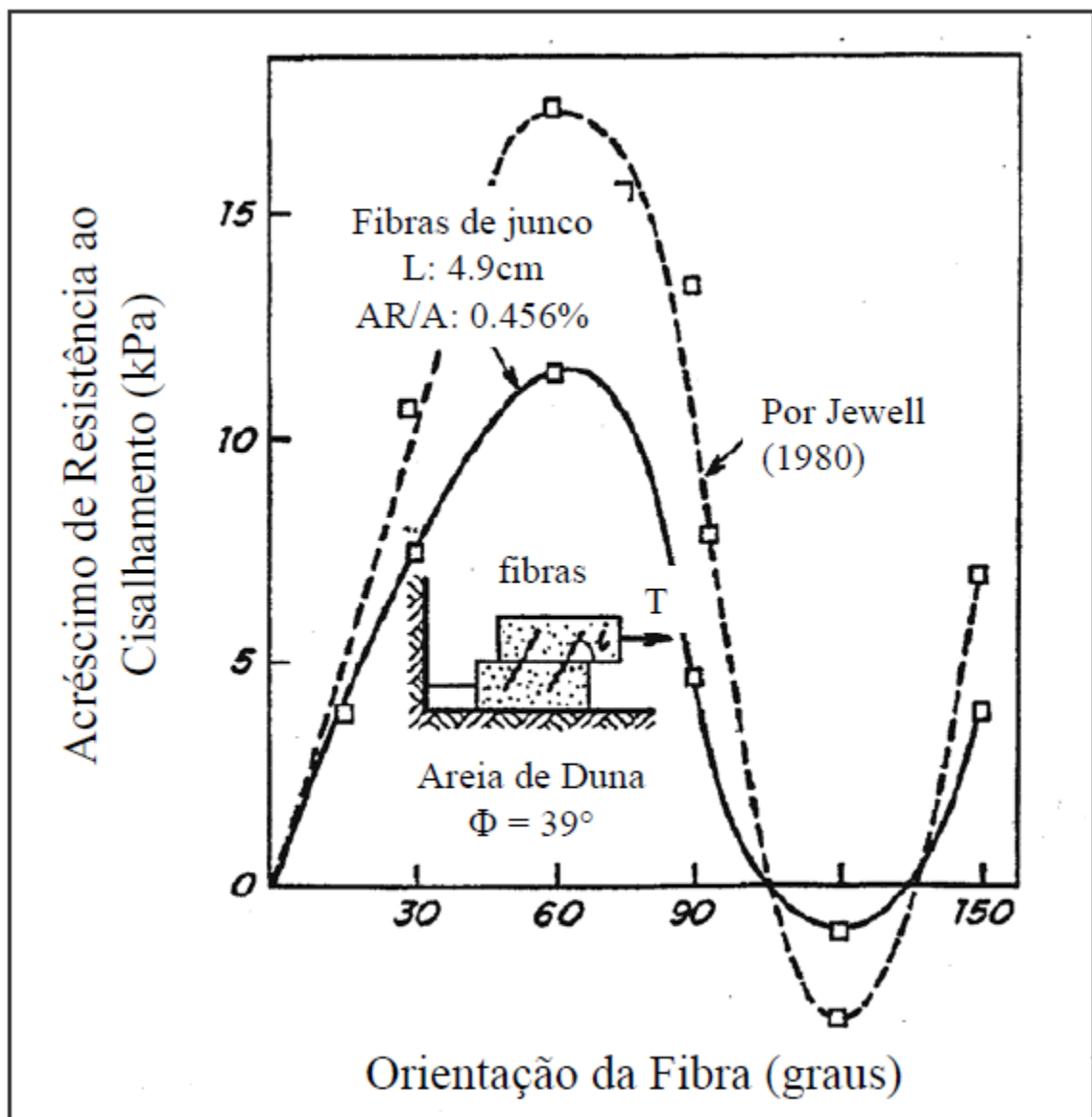


Figura 2.2 - Acréscimo de resistência em função da inclinação da fibra (Gray e Ohashi, 1983)

Módulo de elasticidade da fibra

Gray e Ohashi (1989) observaram que as fibras com baixo módulo se comportaram como uma inclusão extensível, ou seja, não romperam durante o ensaio. Para Montardo (1990) fibras com módulo baixo não contribuem para o aumento da resistência mecânica.

Aderência fibra-matriz

Para Taylor (1994), as fibras devem estar bem aderidas à matriz do compósito para que a sua resistência à tração seja mobilizada.

As características de resistência, deformação e padrões de ruptura de uma grande variedade de compósitos reforçados com fibras dependem fundamentalmente da aderência fibra/matriz. Uma alta aderência entre a fibra e a matriz reduz o tamanho das fissuras e amplia sua distribuição pelo compósito (CASAGRANDE, 2005).

Resistência da fibra

O aumento da resistência das fibras aumenta a ductilidade do compósito, assumindo que não ocorra o rompimento das ligações de aderência. A resistência necessária dependerá, na prática, das características pós-fissuração necessárias, bem como do teor de fibra e das propriedades de aderência fibra-matriz (CASAGRANDE, 2005).

Tensão confinante

Gray e Ohashi (1989), Teodoro (1999) e Casagrande (2005) observaram a existência de uma tensão de confinamento crítica onde, abaixo desta as fibras são arrancadas e, acima desta as fibras são alongadas.

Para Gray e Maher (1989) a tensão confinante crítica é sensível a alguns parâmetros do compósito solo-fibra como fator de forma das fibras (L/D), coeficiente de uniformidade e forma das partículas do solo.

Casagrande (2005) concluiu que as fibras agem mais efetivamente sob tensões efetivas médias iniciais mais baixas.

Densidade relativa (D_r)

Quanto maior for a densidade da mistura, mais cedo as fibras começam a ser mobilizadas dentro da massa de solo, apresentando um melhor intertravamento entre as fibras e a matriz. Para densidades de compactação maiores existe um intertravamento inicial melhor entre a

matriz e o reforço, o que permite que as fibras sejam solicitadas a deslocamentos muito pequenos. Para misturas solo-fibra com densidades menores as fibras passam a atuar após recalques iniciais de maior monta, devido à redução do índice de vazios e maximização dos contatos grãos-fibra (CASAGRANDE, 2005).

Diâmetro das partículas do solo

MAHER; GRAY (1990) realizaram estudo utilizando duas composições de bolas de vidro em lugar do solo, ambas com granulometria uniforme, porém diferentes diâmetros médios das partículas, mostrou que o aumento do tamanho das partículas ($D_{50} = 0.25\text{mm}$ para 0.6mm) diminuiu a contribuição das fibras para a resistência.

2.3 Fibras vegetais

As fibras vegetais podem ser obtidas de diferentes partes da planta, seja do caule, folha ou do próprio fruto. Segundo Santiago (2011) as fibras oriundas das folhas são as de maior interesse para serem utilizadas como reforço, embora fibras de talo, do caule e do fruto também possam ser usadas. De uma maneira geral, as fibras das folhas são mais grossas que as fibras dos talos e são referenciadas como fibras “duras” enquanto as fibras dos talos são chamadas de fibras “macias” e, portanto, mais próprias para fins têxteis

2.3.1 Fibras de Sisal

As fibras de sisal são da espécie *Agave sisalana* sendo suas fibras extraídas da folha da planta, considerada indígena na América do Sul e Central (SANTIAGO, 2011).

A produção de sisal no Brasil se concentra na região nordeste, sendo os estados da Bahia e Paraíba os maiores produtores. O Brasil juntamente com a Indonésia e países do leste africano, está entre os maiores produtores de sisal (MARTINS, 2014).

A cultura do sisal, uma das fibras mais utilizadas mundialmente, é de extrema importância socioeconômica para o Brasil, por ser a única economicamente viável na região semiárida do Nordeste, com cerca de 1 milhão de pessoas que dela dependem para sua subsistência (Mattoso et al., 1997).

Leocadio (2005) diz que as fibras de sisal se classificam no grupo de fibras chamadas "estruturais", cuja função é dar sustentação e rigidez as folhas. Elas se dispõem longitudinalmente ao longo do comprimento da folha. Compreendem três tipos: fibras mecânicas, fibras de fita e fibras de xilema. As fibras mecânicas estão presentes em maior número e dificilmente se dividem durante os processos de manufatura, o que lhes confere maior importância comercial.

O sisal é uma fibra leve, atóxica, que apresenta alto módulo e resistência e custa aproximadamente duas vezes menos que a fibra de vidro. Entre outras vantagens do sisal, é apontada a facilidade de modificação superficial, sua abundância no Brasil e facilidade de cultivo. A microestrutura helicoidal oca do sisal é responsável por um mecanismo de falha diferenciado de outras fibras vegetais, sendo que os compósitos reforçados por sisal apresentam trabalho de fratura similar ao de compósitos de polietileno de altíssimo peso molecular reforçado por fibras de vidro (LEOCADIO, 2005).

As propriedades das fibras do sisal foram pesquisadas por diversos autores. Essas propriedades estão relatadas nas tabelas a seguir, com os respectivos pesquisadores citados.

Tabela 2.1 - Propriedades físicas da fibra de sisal

Diâmetro (mm)	Área (mm ²)	Densidade (g/cm ³)	Cristalinidade (%)	Referência
0.08 - 0.30	-	0,75 - 1,07	-	Tolêdo Filho (1997)
0.15	-	-	-	Santiago (2011)
0.228	-	1.13	-	Pinto (2007)
0.174	-	-	-	Martins (2014)
-	0.023	-	76.3	Fidelis (2014)

Tabela 2.2 - Características de absorção de água da fibra de sisal

Teor de umidade natural (%)	Absorção após 5 minutos (%)	Absorção até saturação (%)	Referência
10.97 - 14.44	67.0 - 92.0	190 - 250	Tolêdo Filho (1997)
9.4	-	-	Santiago (2011)
16.79	348.9	515.7	Pinto (2007)

Tabela 2.3 - Propriedades químicas da fibra de sisal

Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)	Cinzas (%)	Referência
74.0	12.0	10.1	1.2	Santiago (2011))
59.5	18.4	11.9	-	Fidelis (2014)
60.5	25.7	12.1	-	Ferreira (2016)

Tabela 2.4 - Propriedades mecânicas da fibra de sisal

Resistência à tração (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Deformação na ruptura (%)	Referência
227.8 - 1002.3	10.9 - 26.7	2.8 - 4.2	Toledo (1997b)
340.0	112.0	3.3	Santiago (2011)
484.0	19.5	3.3	Fidelis (2014)

2.3.2 Fibra de Curauá

As fibras de curauá são da espécie *Ananas erectifolius* sendo suas fibras extraídas da folha da planta, de ocorrência comum da Amazônia (SANTIAGO, 2011).

O curauá não é exigente quanto ao solo, crescendo até em solo arenoso e pouco fértil inclusive em área degradadas. Seu cultivo não degrada a mata nativa e até mesmo contribui com a revitalização de terras desmatadas. Ela pode ainda ser consorciada com culturas alimentares, o que representa uma fonte alternativa de renda e garante também a segurança alimentar ao pequeno agricultor da região amazônica (SANTIAGO, 2011). Sendo assim, O curauá está entre as fibras mais competitivas, figurando entre as mais economicamente viáveis.

Cada planta de curauá produz cerca de 24 folhas e o rendimento de fibra seca é de aproximadamente 6%, totalizando quase 2 quilos de fibras por planta. Um hectare produz 3.600 quilos de fibra seca ao ano (OLIVEIRA, 2010).

Diversos autores pesquisaram sobre as propriedades físicas das fibras de curauá. Essas propriedades estão relatadas nas tabelas a seguir, com os respectivos pesquisadores citados.

Tabela 2.5 - Propriedades físicas da fibra de curauá

Diâmetro (mm)	Área (mm ²)	Densidade (g/cm ³)	Cristalinidade (%)	Referência
-	0.004	-	80.1	Fidelis (2014)
0.115	-	1.29	-	Pinto (2007)
0.009	-	-	-	Santiago (2011)
0.092 - 0.127	-	1.34	-	Picanço (2005)

Tabela 2.6- Características de absorção de água da fibra de curauá

Teor de umidade natural (%)	Absorção após 5 minutos (%)	Absorção até saturação (%)	Referência
13.6	585.7	709.3	Pinto (2007)
7.9	-	-	Santiago (2011)
11.47	-	449	Picanço (2005)

Tabela 2.7 - Propriedades químicas da fibra de curauá

Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)	Cinzas (%)	Referência
59.4	19.1	14.4	-	Fidelis (2014)
71.2	12.1	7.4	0.9	Santiago (2011)
58.8	23.8	14.7	-	Ferreira (2016)

Tabela 2.8- Propriedades mecânicas da fibra de curauá

Resistência à tração (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Deformação na ruptura (%)	Referência
543.0	63.7	1.0	Fidelis (2014)
492.6	11.5	3.0	Picanço (2005)
605.0	23.0	2.5	Santiago (2011)

2.3.3 Fibra de Coco

As fibras de coco são provenientes da porção externa do fruto da palmeira de coco *Cocos nucifera* L. Existem duas variedades dessa espécie, sendo a primeira a atingir 30 metros e a menor 3 metros, porém as propriedades e características físicas são as mesmas.

Tomzack (2010), para definir as propriedades físicas e mecânicas das fibras de coco, realizou diversos trabalhos onde os diâmetros variaram de 0.131 a 0.229 mm com fibras de 20 mm. Através das curvas de tensão vs. deformação, foi determinado o módulo de elasticidade a partir

da porção linear inicial da curva. A tensão de ruptura foi determinada como a última tensão na qual a fibra suportou, na região última de deformação plástica, atingindo a valores de 37,54 a 182,2 (MPa) estes fatores apresentam uma tendência de aumento em relação à velocidade de ensaio.

Na tabela a seguir estão apresentadas diferentes propriedades das fibras de coco, determinadas por diferentes pesquisadores.

Tabela 2.9 - Propriedades mecânicas da fibra de coco

Resistência à tração (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Deformação na ruptura (%)	Referência
174	3,50	25	Toledo Filho (1997)
95 - 118	2,80	23,9 - 51,4	Savastano e Agopyan (1998)
100 - 250	3,00	30,0	Tomczak (2010)

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Considerações iniciais

O programa experimental estabelecido tem como objetivo investigar e identificar o efeito da adição de fibras de naturais nas propriedades mecânicas de um solo argiloso. Foram investigados parâmetros de resistência, deformabilidade, compactação, dentre outros, diante de variação de fatores como comprimento e teor de fibras. Nos ensaios realizados foram utilizadas teores de fibras de 0,5% em peso de solo seco para cada tipo de fibra e fibras de 50 mm e 25 mm, sendo assim possível observar a variação dos parâmetros mecânicos do solo. As fibras foram inseridas de forma aleatória ao solo. Maiores teores de fibras implicam em impossibilidades mecânicas de mistura.

Amostras de solo com fibras adicionadas foram expostas ao tempo por três meses, em moldes ao ar livre, para que seja estudado também o comportamento de degradação de cada tipo de fibra inserida no solo argiloso. Assim, também foi executado ensaio de compressão simples para fibras recém inseridas e as supostamente degradadas pelo tempo. O ensaio de compressão simples será executado para três meses de exposição.

3.2 Caracterização dos materiais

3.2.1 Fibras utilizadas

As fibras de curauá são comercializadas pela empresa Pematec Triangel do Brasil, da cidade de Santarém/ Pará e as fibras de sisal são comercializadas pela Associação de Desenvolvimento Sustentável e Solidário da Região Sisaleira (APAEB), do município de Valente/ Bahia. Ambas as fibras são extraídas das folhas das plantas pelo processo mecânico chamado decortização. Nesse processo, as folhas são esmagadas por um rolo em movimento coberto de facas, onde somente as fibras prevalecem. Estas fibras vegetais foram escolhidas por apresentarem boas propriedades mecânicas e pela necessidade de novas matérias-primas provenientes de fontes renováveis, que possam substituir com sucesso as fibras sintéticas. A utilização de fibras vegetais, além de garantir a confecção de um produto ecologicamente correto, pode garantir uma nova alternativa de renda para agricultores das regiões produtoras quando

produzidas em escala industrial.



Figura 3.1- Fibras de sisal



Figura 3.2 - Fibras de curauá



Figura 3.3- Fibras de coco

Para a preparação das misturas, as fibras foram cortadas em comprimentos de 25 e 50 mm aproximadamente, o que diminui o emaranhamento entre elas e foram distribuídas de forma aleatória na argila característica de Brasília.

3.2.2 Água

A água utilizada na preparação dos corpos de prova para os ensaios é destilada, processada no local onde foram realizados os ensaios, no laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília.

3.2.3 Solo

O solo argiloso laterítico é proveniente do Campo Experimental de Fundações e Ensaios de Campo do Programa de Pós-graduação da Universidade de Brasília, situado no Campus Universitário Darcy Ribeiro, na Asa Norte do Plano Piloto de Brasília, no Distrito Federal.



Figura 3.4- Solo do Campo Experimental da UnB

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília e seguindo os seguintes procedimentos e métodos:

- Ensaio de granulometria (NBR 7181 - ABNT, 1984);
- Massa específica real dos grãos (NBR 6508 - ABNT, 1984);
- Determinação do Limite de Liquidez (NBR 6459 - ABNT, 1984);
- Determinação do Limite de Plasticidade (NBR 7180 - ABNT, 1984).

3.3 Preparação dos materiais

O presente tópico tem como objetivo mostrar os métodos de preparação dos

materiais e das misturas para poder realizar os ensaios que serão apresentados mais adiante neste capítulo.

3.3.1 Preparação das misturais para ensaio

Para a preparação das misturas foi realizada, inicialmente, a secagem ao ar do solo argiloso para posterior destorroamento e peneiramento na peneira de 2 mm, como requerido para solos lateríticos. Em seguida o solo é acondicionado em sacos plásticos hermeticamente fechados.

As fibras são cortadas no tamanho desejado, seja de 50 mm ou 25 mm, pesadas na proporção de 0,5% em peso de solo seco e separadas para futura mistura com solo.



Figura 3.5- Fibras cortadas

Para a preparação dos corpos de prova para os ensaios propriamente ditos, inicialmente pesa-se a quantidade requerida de solo, adiciona-se o teor de fibra com determinado comprimento e coloca-se a quantidade de água necessária, misturando as fibras de forma aleatória e o mais uniforme possível para a criação do compósito.

Foram preparados seis corpos de prova para o ensaio de compressão simples (três tipos de fibras e duas variações de comprimento. Corpos de prova contendo apenas solo também foram moldados para comparar o ganho de resistência que a presença das fibras pode causar.

No ensaio de compactação foram moldados 5 corpos de prova para cada tipo e comprimento de fibra, variando o teor de umidade, totalizando 30 corpos de prova.

3.4 Métodos e procedimentos de ensaio

Neste item são apresentados os ensaios e demais procedimentos utilizados durante o programa experimental. Para os ensaios que foram realizados baseando-se em procedimentos propostos em normas técnicas, será feita referência à mesma. Em caso contrário será descrito de forma mais detalhada.

3.4.1 Ensaio de compactação Mini-MCV

É um procedimento de compactação dinâmica de solos passando na peneira de 2 mm de abertura, realizado em laboratório, com corpos-de-prova tipo miniatura, de 50 mm de diâmetro, denominado Mini-MCV. São determinados coeficientes empíricos utilizados na caracterização e classificação de solos tropicais.

O método a ser seguido é descrito e normatizado na DNER -ME 258/94. Foram executados para amostras de cada um dos três tipos de fibras, e para o teor de 0,5% e comprimentos de 25 mm e 50 mm.

Os ensaios foram executados no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília no compactador de amostras para o ensaio Mini-MCV.



Figura 3.6- Equipamento de compactação em miniatura

3.4.1.1 Preparação dos corpos de prova

Primeiramente o solo argiloso seco recebe um teor de água diferente para que seja possível avaliar a relação entre umidade e peso específico aparente seco. Após a inserção da água insere-se as fibras que formarão os compósitos.

Este ensaio exige certa precisão na quantidade de solo a ser ensaiada, uma vez que estabelece que os corpos de prova produzidos tenham altura de 50 mm, com margem de erro de 1 mm para mais ou para menos. Sendo assim foram realizadas algumas repetições até encontrar uma quantidade de solo e fibra que estejam dentro dos limites estabelecidos pela norma.

Para a correção da quantidade de compósito a ser compactada foi utilizada a seguinte fórmula, dada pela norma DNER -ME 258/94.

$$Mn = \frac{Mv * 50}{h}$$

Sendo:

- Mn: massa corrigida a ser utilizada no ensaio;
- Mv: massa de solo do ensaio que não atingiu os limites estabelecidos.
- h: altura do corpo de prova fora dos limites.

Foi utilizada a energia intermediária neste ensaio.

3.4.2 Ensaio de compressão simples

O ensaio de compressão simples será executado pelo método estabelecido pela NBR 12770 - ABNT, 1992. Foram executados para amostras de cada um dos três tipos de fibras, e para o teor de 0,5% e comprimentos de 25 mm e 50 mm, além de repetir os ensaios para tempo de degradação de 3 meses.

O ensaio de compressão simples é o método mais simples e rápido para determinar a resistência ao cisalhamento de solos coesivos e somente deste tipo de solo. O ensaio fornece o valor da coesão (resistência não drenada) de campo do solo, para isso deve ser feito com amostra indeformada e conservando sua umidade natural. Pode ainda ser usado para amostras de solos compactados.

Este ensaio será capaz de mostrar se a variação do teor de fibra, origem e comprimento das fibras aumentará a resistência ao cisalhamento do solo, e se esse aumento será relevante ou não, podendo assim, fazer com que o solo se torne adequado ao uso em projetos.

A Norma prescreve o método para determinação da resistência à compressão de corpos-de-prova constituídos de solo coesivo, mediante aplicação de carga axial.

3.4.2.1 Equipamento

Para este ensaio foi utilizada a prensa demonstrada na figura 3.9, da fabricante Solotest, com capacidade de medir a carga aplicada e a deformação consequente de forma direta, através de mostrador digital. O aparelho foi utilizado no modo CBR, mas com corpo como mostrado na figura 3.7. Isso fez com os ensaios tenham uma deformação máxima de 1270 c*mm registrados, quando o ensaio é dado como finalizado.



Figura 3.7 - Equipamento para ensaio de compressão simples

A célula capaz de medir a deformação corrente é do modelo mostrado na imagem a seguir, com capacidade de até 5.000 kgf.



Figura 3.8 – Célula de carga Solotest

3.4.2.2 Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova foram compactados no mesmo equipamento utilizado no ensaio de compactação mini. Foram separadas amostras de solo e fibra e compactados em quatro camadas, com processo de escarificação entre camadas para realizar a aderência entre camadas. A altura dos corpos de prova obedeceu ao dito pela norma, onde a altura deve ser pelo menos duas vezes maior que o diâmetro do corpo de prova.

Todos os corpos de prova foram rompidos na umidade ótima respectiva do compósito.

3.5 Investigação da degradação das fibras submetidas ao envelhecimento natural

Para investigação da degradação das fibras foram moldados 18 corpos de prova (3 para cada tipo de fibra, com objetivo de garantir a execução do ensaio futuro), em procedimento semelhante ao realizado para o ensaio de compressão simples. Esses corpos moldados foram expostos ao tempo em moldes de PVC com a parte superior aberta e a parte inferior fechada com papel filtro, visando a passagem somente de água.

A exposição dos corpos se iniciou no dia 21/08/2018 na cidade de Águas Claras, em Brasília-DF, em local propício à incidência direta de raio solar e possível chuva.



Figura 3.9- Corpos em exposição



Figura 3.10- Imagem mais próxima dos corpos em exposição

Os corpos foram retirados do local no dia 21/11/2018, totalizando 3 meses de exposição. Os corpos foram destruídos e as fibras supostamente degradadas foram retiradas e utilizadas na confecção de novos corpos a serem rompidos.

A retirada das fibras em exposição da matriz de solo se mostrou complicada e demorada. Primeiro foi realizada a retirada das fibras mais expostas, que são removidas de forma mais simples e guardadas. Já para a retirada das fibras presentes no centro da matriz de solo foi realizado um procedimento parecido com destorroamento, porém de forma mais delicada para não danificar as fibras. Após esse processo o conteúdo foi peneirado e quase a totalidade das fibras se mantiveram acima da peneira (devido a sua rigidez). Assim, as fibras foram coletadas

para a seguinte compactação e ensaio de compressão. Especialmente as fibras de 25 mm se mostraram de maior dificuldade de retirada, devido ao seu menor comprimento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No desenvolvimento deste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados dos ensaios descritos no capítulo três. Estes ensaios têm o objetivo de estudar e avaliar o comportamento das misturas (solo-fibra) procurando melhorar os parâmetros de resistência das argilas.

4.1 Caracterização do solo puro

Os índices físicos e a curva granulométricas para o solo são apresentadas a seguir. De acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), esta é uma argila de baixa compressibilidade (CL). Pelos resultados dos ensaios de granulometria e limites de Atterberg, foi possível classificar o solo de acordo com a Classificação TRB, em um material argiloso, pertencente ao grupo A-7-6 e com Índice de grupo igual a 10. Este material é considerado de comportamento regular a mau para aplicação em pavimentos. A classificação MCT estabelece o solo como LG', de comportamento "laterítico-argiloso".

Tabela 4.1 - Índices físicos da argila de Brasília

Índices Físicos	Valor
Massa específica (δ)	25 g/cm ³
Limite de Liquidez (LL)	42%
Limite de Plasticidade (LP)	27%
Índice de Plasticidade (IP)	15%

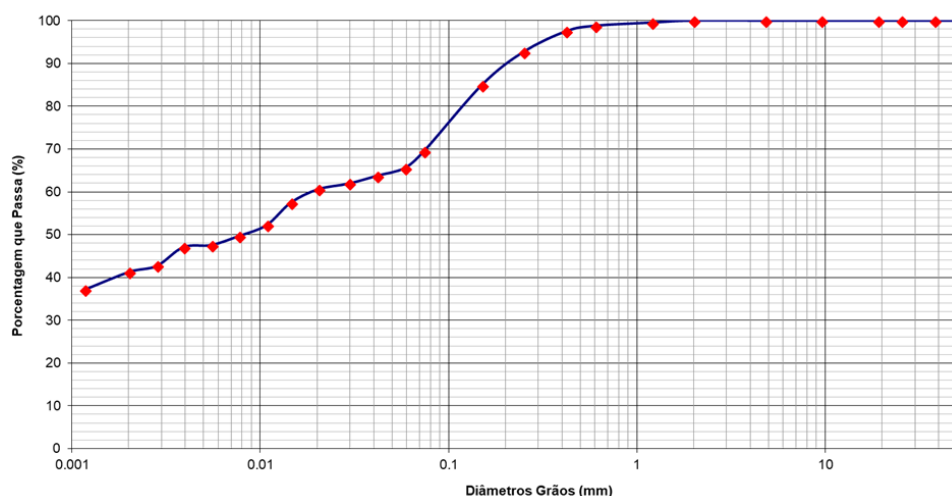


Figura 4.1 - Curva granulométrica da argila de Brasília

O ensaio Mini-MCV com o solo puro foi executado para seis teores de umidade. Pelo resultado desse ensaio foi possível perceber que o Peso Específico Aparente Seco máximo do solo tem o valor próximo de $16,80 \text{ kN/m}^3$ e a W_{ot} de 19,80%. Com esse resultado foi possível comparar as curvas de compactação obtidas com o solo com fibras adicionadas.

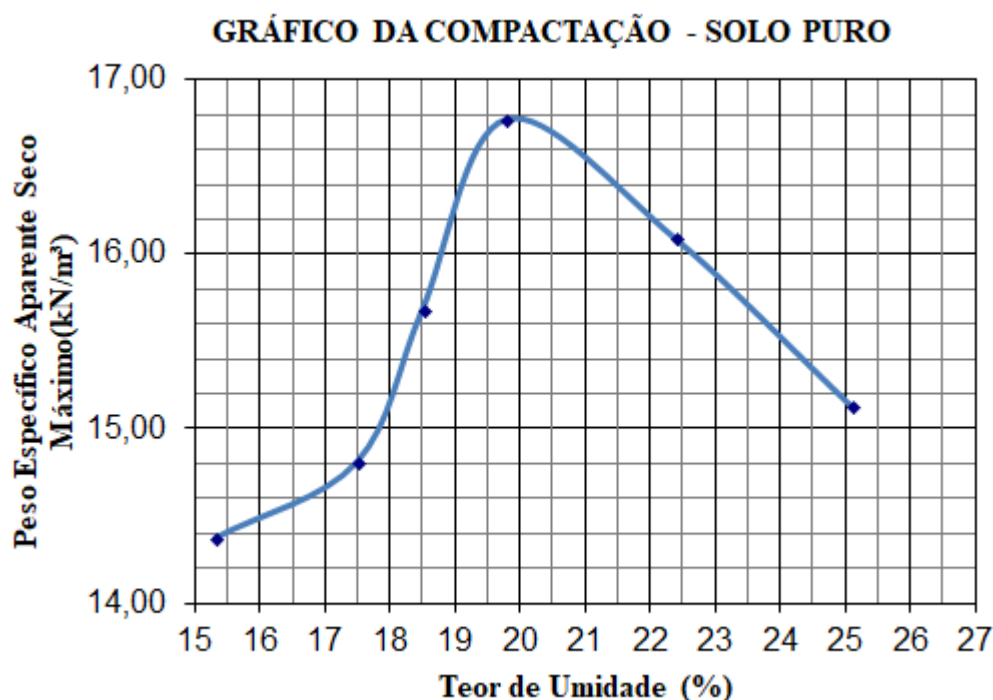


Figura 4.2- Curva de compactação do solo puro

4.2 Ensaio de compactação mini-MCV

Aqui são apresentados os resultados obtidos de curva de compactação para cada compósito, com respectivo teor de fibra. Serão também apresentados gráficos comparativos gerais e específico para cada tipo de fibra, a fim de observar a variação do peso específico aparente seco e teor de umidade em cada caso.

4.2.1 Fibras de coco

Os compósitos com fibra de coco apresentaram um aumento na umidade ótima e uma redução do peso específico aparente seco máximo, mesmo que pequena. Enquanto o compósito com fibras de 50 mm apresentou peso específico aparente seco máximo $16,70 \text{ kN/m}^3$ e W_{ot} de 21,90%, o com fibras de 25 mm apresentou peso específico aparente seco máximo $16,25 \text{ kN/m}^3$ e W_{ot} de 22,10%.

Nota-se pelo gráfico a seguir que compósito com fibras de maior comprimento se mostrou mais próximo ao solo puro do que o compósito com fibras menores. O peso específico aparente máximo com fibras de 50 mm se aproximou do obtido no solo puro, mesmo com o aumento de umidade. A umidade ótima de ambos os compósitos se aproximaram, sendo quase idênticas.

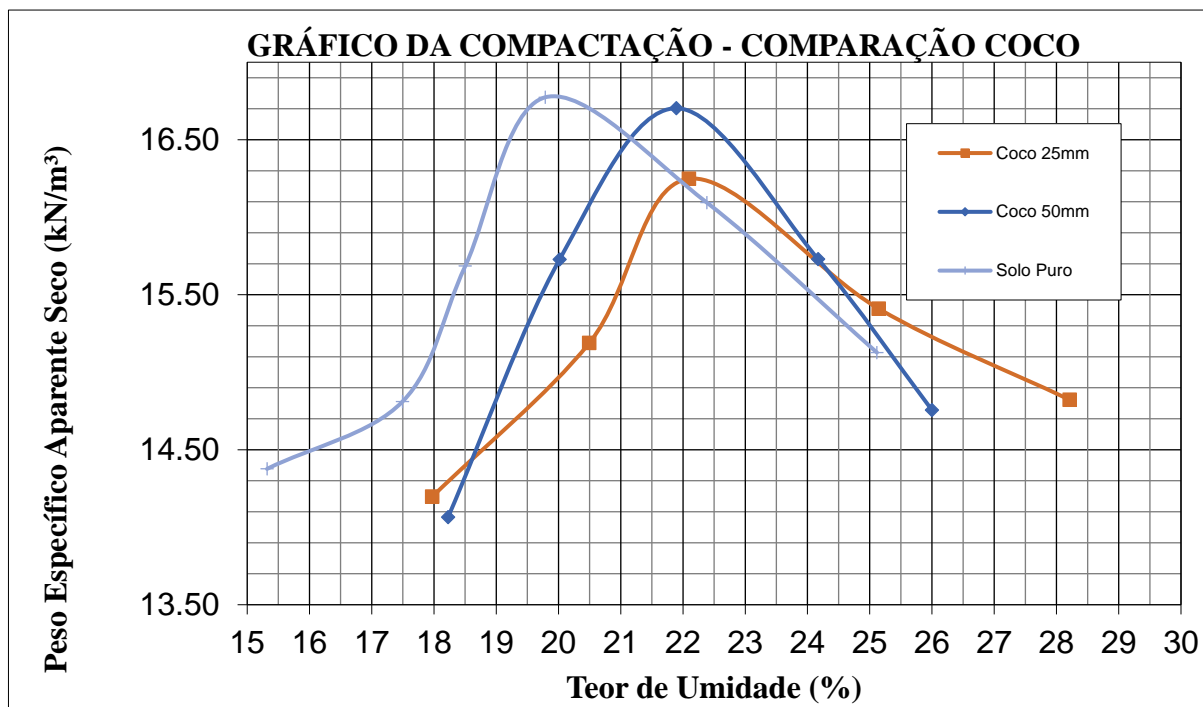


Figura 4.3 – Curva de compactação coco e solo puro

4.2.2 Fibras de sisal

Os compósitos de sisal apresentaram diferença maior nos valores em relação ao solo puro, se comparados ao compósito de coco. Enquanto o compósito com fibras de 50 mm apresentou peso específico aparente seco máximo $16,10 \text{ kN/m}^3$ e W_{ot} de 21,40%, o com fibras de 25 mm apresentou peso específico aparente seco máximo $16,00 \text{ kN/m}^3$ e W_{ot} de 23,50%.

Ambos compósitos resultaram em uma maior umidade ótima (sendo o aumento mais significativo no de 25mm) e uma redução no peso específico aparente seco máximo, que se mostrou bem semelhante entre os comprimentos de fibra. Comparando o gráfico abaixo com o caso do compósito de coco é possível notar que o sisal obteve uma maior redução do peso específico aparente seco máximo e uma maior diferença entre os teores de umidade ótima.

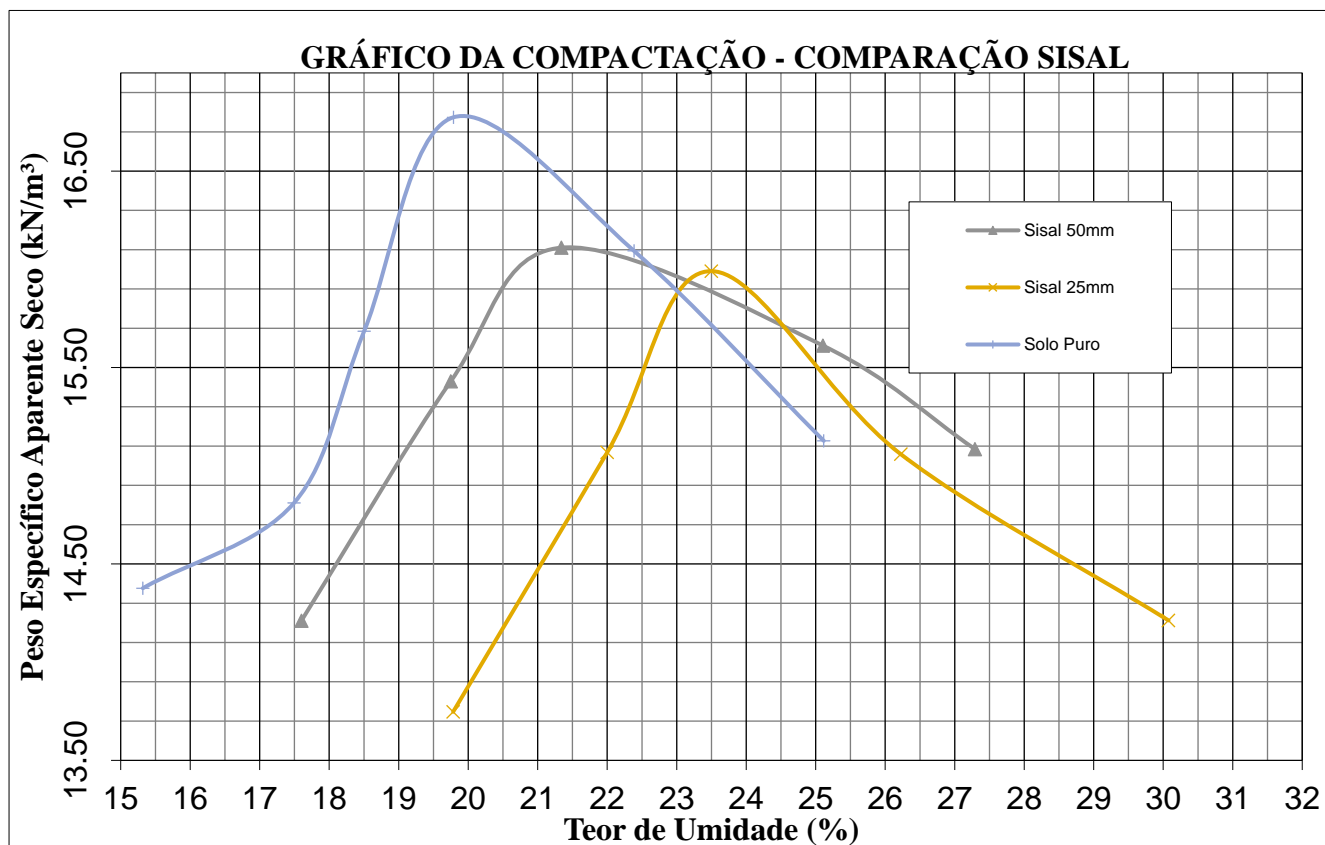


Figura 4.4 – Curva de compactação sisal e solo puro

4.2.3 Fibras de curauá

Dos compósitos estudados o de curauá foi o que apresentou a diferença mais significativa nos resultados, com maior redução do peso específico aparente seco máximo e aumento da umidade ótima.

Enquanto o compósito com fibras de 50 mm apresentou peso específico aparente seco máximo $15,60 \text{ kN/m}^3$ e W_{ot} de 22,20%, o com fibras de 25 mm apresentou peso específico aparente seco máximo $15,25 \text{ kN/m}^3$ e W_{ot} de 25,00%.

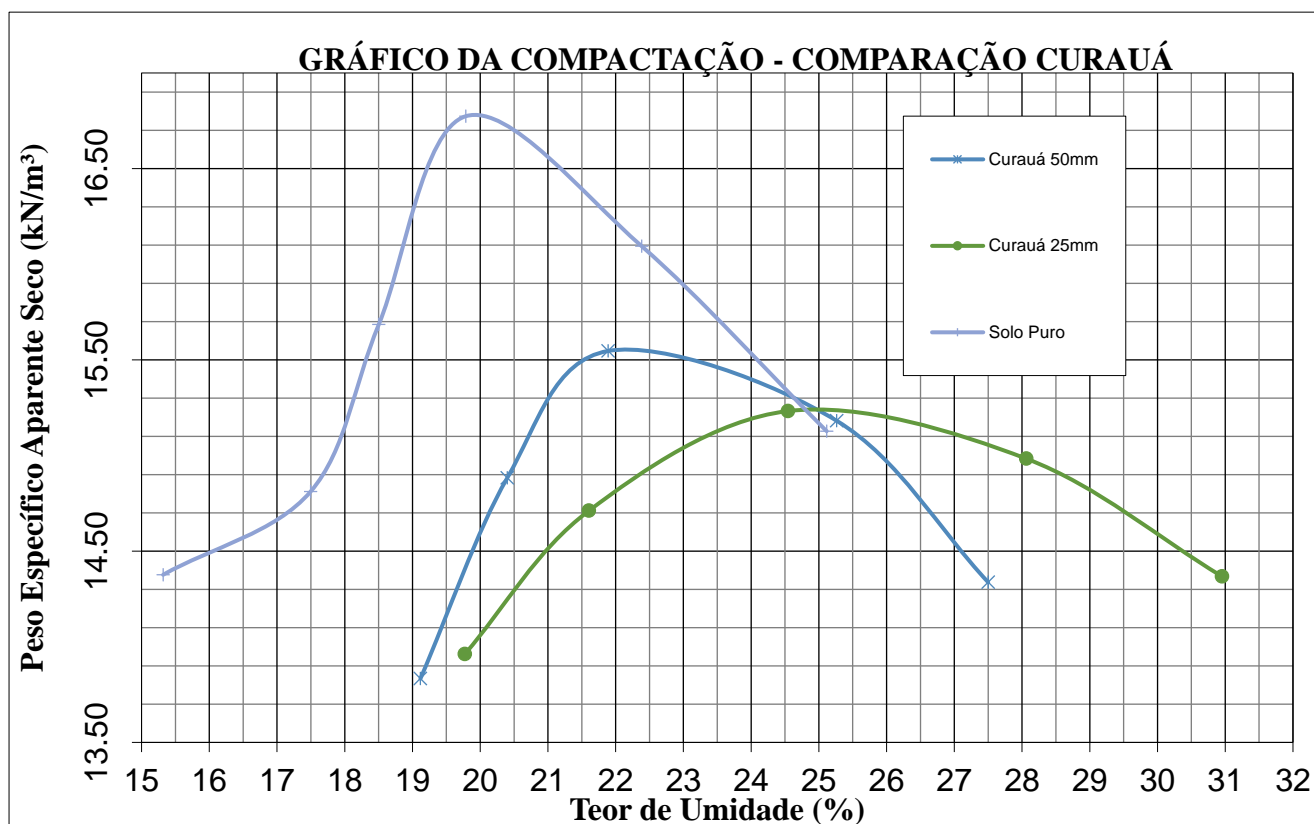


Figura 4.5 – Curva de compactação curauá e solo puro

4.2.4 Análise de resultado para o ensaio de compactação mini-MCV

Após a realização das compactações foi possível notar que em todos os casos o compósito apresentou uma redução do peso específico aparente seco máximo e um aumento da umidade ótima. Esse efeito foi observado mais intensamente nas fibras de curauá. AL-WAHAB & AL-QURNA (1995) já observaram esse resultado em argilas, onde com o acréscimo de 2% de fibra os mesmos efeitos ocorrem, mas os autores interpretaram como insignificantes essas alterações.

Vários autores interpretaram como MAHER & HO (1994) CASAGRANDE (2001) e HEINECK (2002) relataram não terem encontrado quaisquer alterações significativas pela inclusão de fibras.

A diminuição da densidade do corpo é esperada tendo em vista que as fibras, apesar de serem inseridas na proporção de apenas 0,5% de solo seco, tem uma densidade muito inferior

à do solo, gerando um volume grande no compósito. As fibras também apresentam certa absorção de água, o que modifica a umidade ótima do sistema.

Contudo, essas mudanças, tanto no peso específico aparente seco máximo quanto na umidade ótima, não se mostraram significativas.



Figura 4.6 – Corpos de prova do ensaio de compactação mini (Coco)

Tabela 4.2 Comparativos PEASM e Umidade ótima dos compósitos

COMPÓSITO	PESO ESPECÍFICO APARENTE SECO MÁXIMO (kN/m^3)	UMIDADE ÓTIMA (%)
Solo Puro	16,80	19,80
Sisal 50mm	16,10	21,40
Sisal 25mm	16,00	23,50
Coco 50mm	16,70	21,90
Coco 25mm	16,25	22,10
Curauá 50mm	15,60	22,20
Curauá 25mm	15,25	25,00

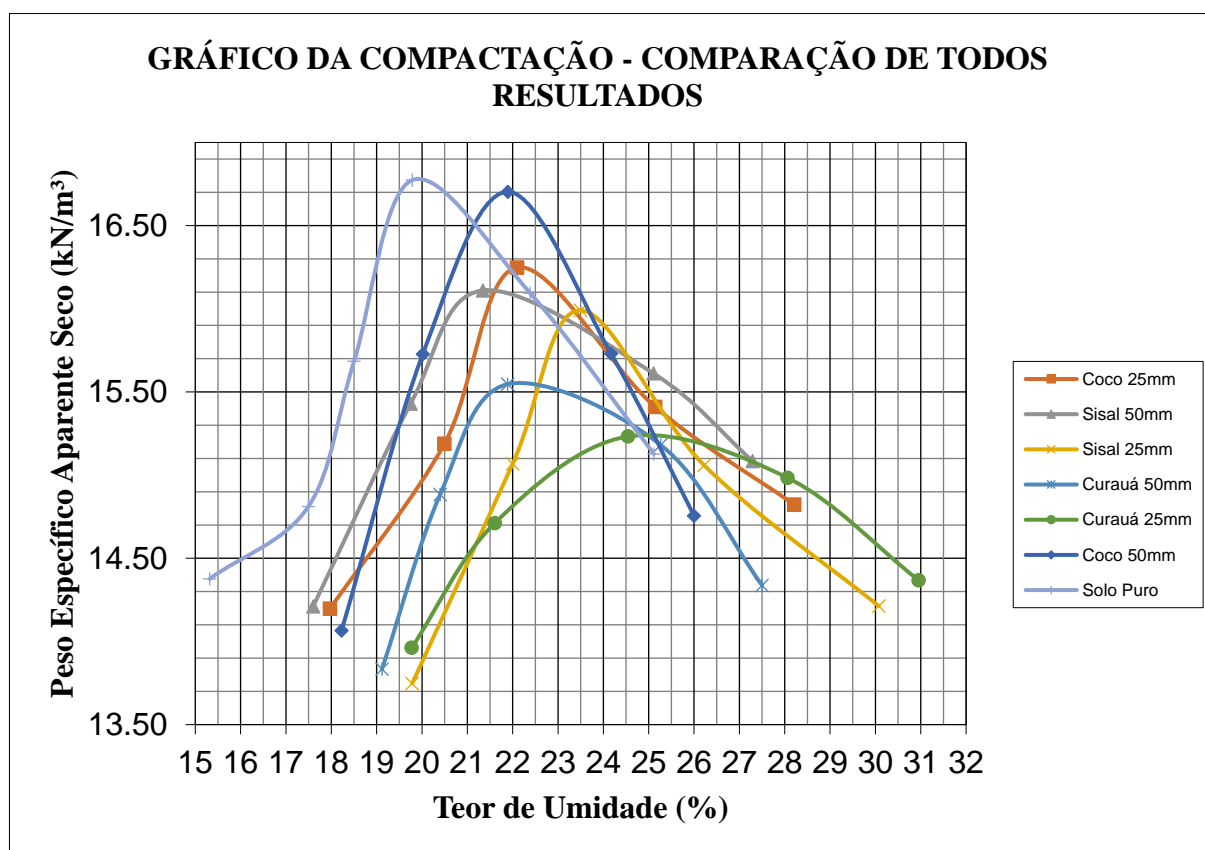


Figura 4.7 – Curvas de compactação

4.3 Ensaio de Compressão Simples

Nesta sessão são apresentados os resultados obtidos de curva Tensão x Deformação para cada compósito, com respectivo comprimento de fibra. Serão também apresentados gráficos comparativos gerais e específico para cada tipo de fibra, a fim de observar a variação da tensão e deformação em cada casa, para posteriormente analisar o comportamento do compósito.

4.3.1 Fibras de coco

Os compósitos com fibra de coco apresentaram uma grande variação na tensão máxima, onde inicia-se uma grande deformação específica para uma mesma tensão aplicada. Observa-se que para o compósito de 50 mm mesmo quando se registra a primeira queda na tensão aplicada ainda se observa uma subida nesse valor. Quanto ao compósito de 25 mm, logo atingido o valor de pico não se observa novos ganhos de tensão, apenas aumento da deformação.

As tensões máximas registradas foram diferentes entre compósitos. A deformação começa a ser significativa no compósito de 50mm a partir de cerca de 445kPa, enquanto no compósito de 25 mm essa tensão é de 321kPa.

Foi possível notar a diferença entre o comportamento dos compósitos e do solo puro, tendo esse último apresentado comportamento frágil, com queda na curva de tensão e deformação.

A deformação inicial acentuada na fibra de coco de 50mm chamou atenção, principalmente devido ao fato de que a degradada não apresentou essa deformação. A explicação mais plausível para essa deformação é o acomodamento inicial do cilindro do ensaio de compressão, que não se encontrava perfeitamente paralelo ao corpo de prova.

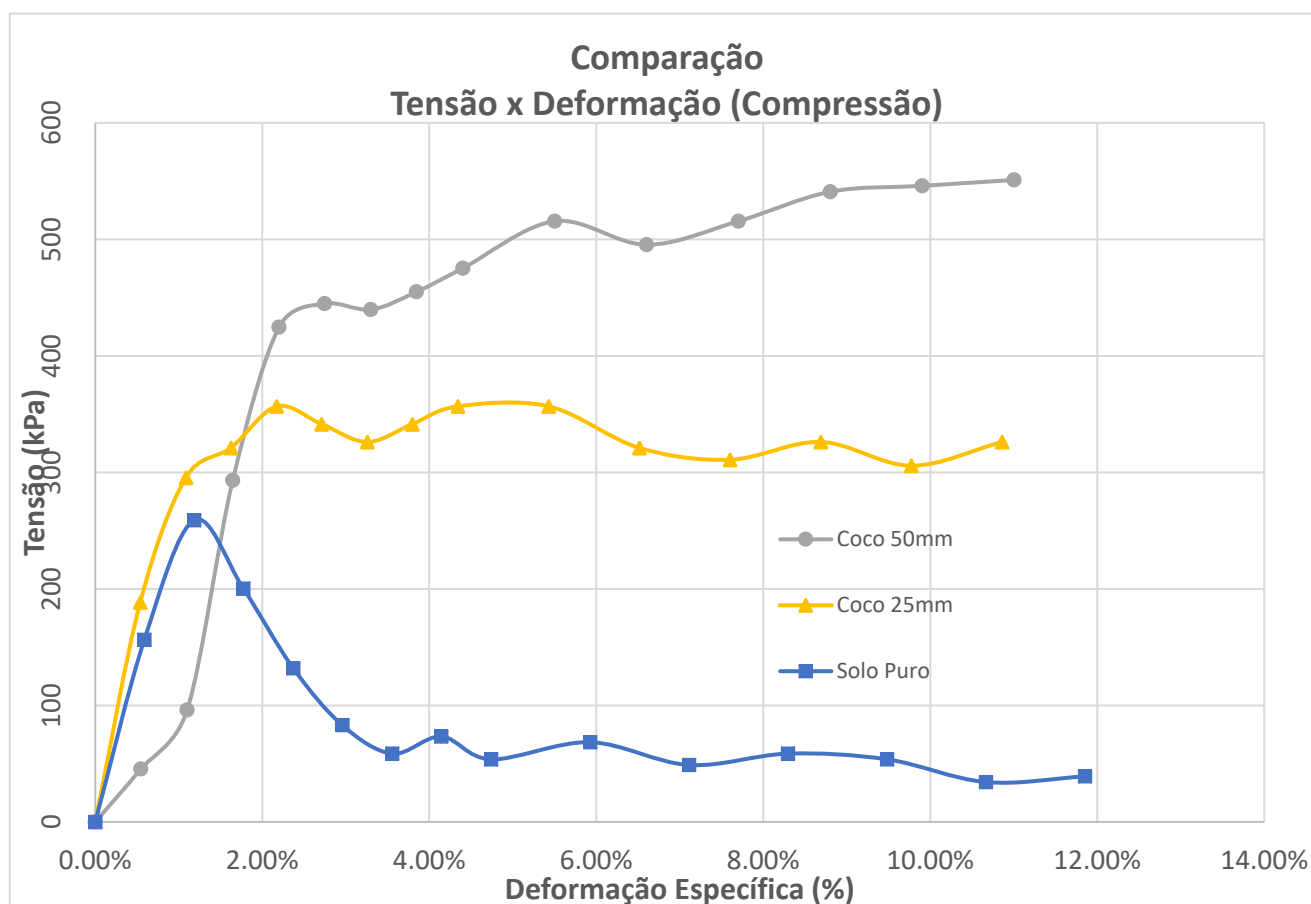


Figura 4.8 – Curva de tensão x deformação coco e solo puro

4.3.2 Fibras de sisal

Os compósitos de sisal se mostraram com comportamento similar aos de coco. O comportamento para ambos os comprimentos de sisal se mostra inicialmente parecido, com tensão no início do escoamento semelhante, mas distanciando após certa deformação. Para o compósito de 50 mm a deformação começa a ser notória em cerca 460kPa enquanto no de 25 mm se mostra mais significativa em 430kPa.

Assim como no caso do coco, no caso de 25 mm não há grandes ganhos de tensão após logo atingir o início da deformação. Diferentemente, no compósito de 50mm há ganhos na tensão, resultando no gráfico a seguir, onde é possível notar esse aumento de tensão máxima.

A mesma diferença de comportamento ocorrida com coco pode ser vista se comparar o compósito de sisal e o solo puro. Solo puro com comportamento frágil e compósito com capacidade de deformar sem perder capacidade de resistência.

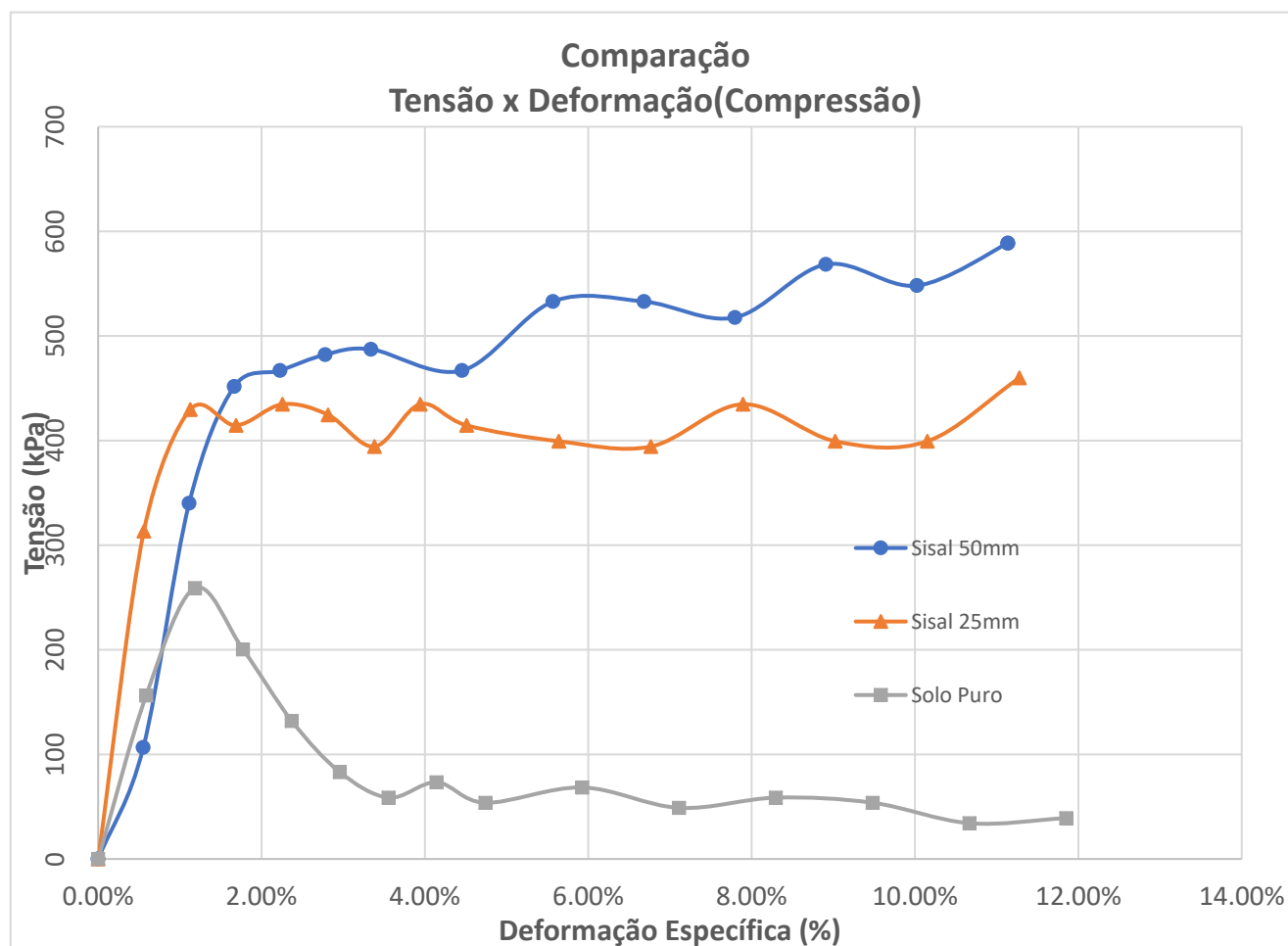


Figura 4.9 – Curva de tensão x deformação sisal e solo puro

4.3.3 Fibras de curauá

Diferentemente dos demais, o compósito de curauá se comportou de forma bem semelhante para ambos os comprimentos, as curvas crescem praticamente juntas, tendo o início da deformação mais expressiva em por volta de 450kPa.

Nota-se que, como no caso das outras fibras, a de 50 mm apresenta um ganho maior na tensão ao decorrer da curva, porém esse ganho é bem mais leve se comparado ao que ocorre na comparação das outras fibras.

Novamente o mesmo comportamento foi observado se comparar solo puro e compósito.

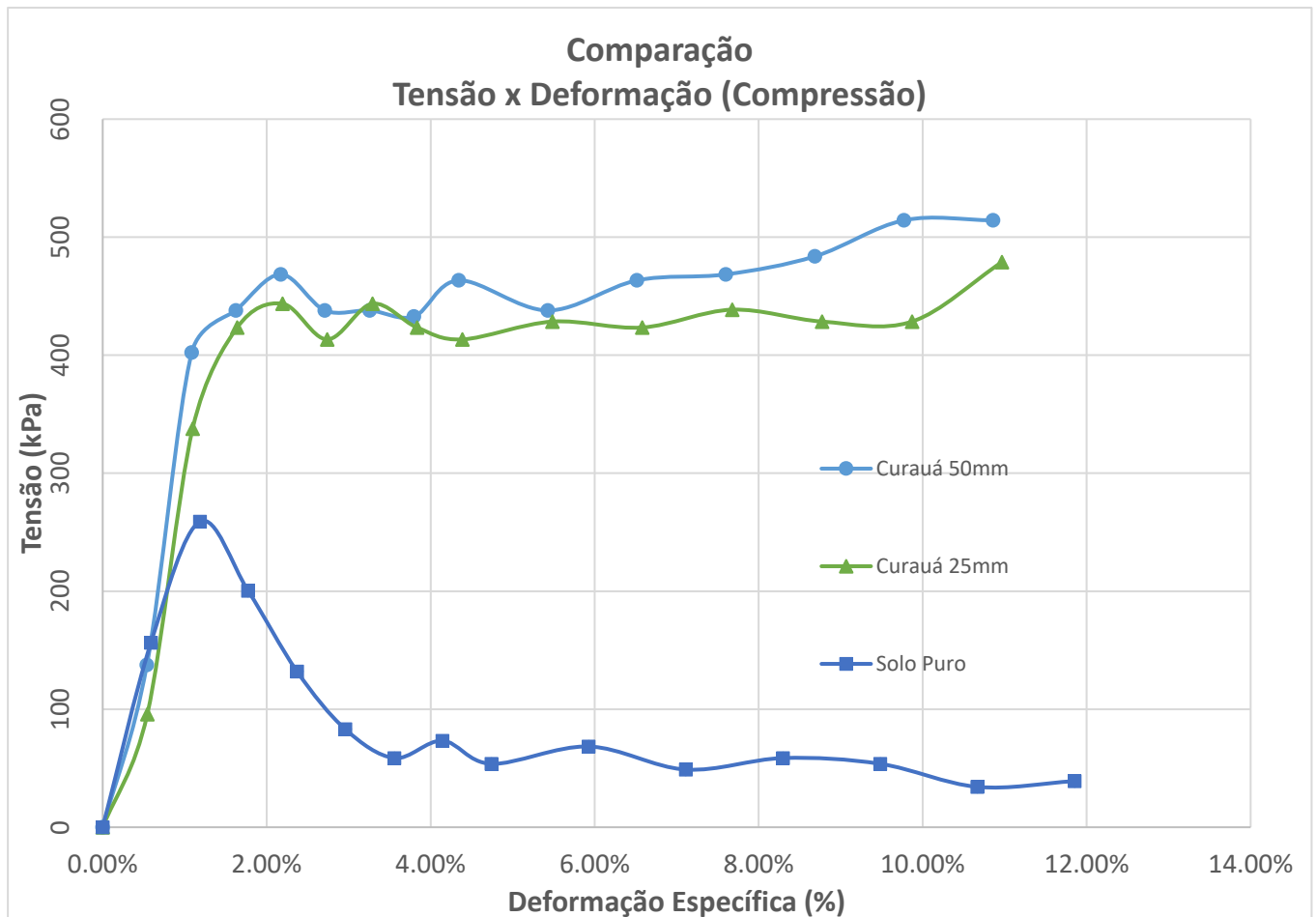


Figura 4.10 – Curva de tensão x deformação curauá e solo puro

4.3.4 Análise de resultado para o ensaio de compressão

Observa-se pelos resultados que os compósitos com fibras de 25 mm registram uma menor deformação inicial se comparados aos com fibra de 50 mm. Tal comportamento foi explicitado por MAHER & HO (1994), onde é dito que fibras de menor comprimento são mais numerosas dentro da matriz e apresentam melhor espalhamento, sendo exigidas já nos primeiros instantes de carga aplicada. Com o aumento de carga aplicada as fibras de 50 mm são finalmente requisitadas, e apresentam um certo ganho de capacidade de carga e um comportamento mais dúctil.

CASAGRANDE (2005) diz que o maior comprimento da fibra apresenta uma maior ancoragem, quanto maior for o comprimento das fibras menor será a possibilidade delas serem

arrancadas. Esse fator se mostra relevante ao analisarmos o ganho de resistência apresentado pelos compósitos com fibras de 50mm, onde a maior ancoragem impede as fibras maiores de serem arrancadas, algo que não ocorre nas fibras de 25 mm, que são logo arrancadas da matriz.

O fator de forma (L/D) das fibras, apresentado por Taylor (1994) ajuda a entender o comportamento da fibra no compósito. Segundo equacionamento proposto pelo autor mostrado no capítulo 2, se a fibra tem alta resistência à tração, ou a resistência de aderência deverá ser alta para impedir o arrancamento antes que a resistência à tração seja totalmente mobilizada, ou fibras de alta relação l/d deverão ser utilizadas. A fibra de curauá apresenta maior relação l/d dentre todas as fibras, mas também apresenta a maior resistência à tração e menor deformação no rompimento, fazendo com que esta seja arrancada mais facilmente.

Festugato (2008) ainda propõe que fibras com fator de forma maior que 300 tendem a contribuir mais para a melhoria do compósito. Isso é observado pelos experimentos desse trabalho, onde os compósitos com fibras de 50 mm (fator de forma maior que 300) se comportaram melhor do que os de 25 mm (fator de forma menor que 300).

Ainda sobre o fator de forma, cabe notar que dentre as fibras de 25mm a de curauá foi a que apresentou melhor comportamento ao final da curva se comparada às outras fibras de mesmo tamanho. Isso pode ser explicado ao se observar que o fator de forma de curauá de 25 mm, mesmo que menor que o valor de 300 idealizado por Festugato (2008), ainda é maior do que o das outras fibras. O comportamento para fibras maiores pode não ter sido governado pelo fator de forma (todas maiores que 300), mas sim pela resistência à tração da fibra e da deformação na ruptura de cada fibra, sendo o coco a fibra com maior deformação e o curauá a fibra com maior resistência à tração e menor deformação.

Pelas fotos dos corpos de prova a seguir e a evolução das fissuras durante o ensaio de compressão foi possível notar que a inclusão de fibra não impede o surgimento de fissuras, mas causa a redução do tamanho das fissuras, como dito por Teodoro (1999).

Durante o ensaio, percebe-se que grande diferença entre os modos de ruptura dos corpos. Enquanto o corpo sem fibras apresenta fissura crescente, iniciando na base e buscando o topo do corpo de prova, os corpos reforçados se alargam na meia altura e algumas placas de solo se soltam da matriz, sendo que boa parte dessas placas são seguradas por fibras.

Sotomayor (2014) realizou ensaio de placa em areas reforçadas com fibra de coco. Segundo o autor o modo de ruptura mudou para um caso causado por puncionamento, e não cisalhamento.



Figura 4.11 Corpo de prova de coco 25mm



Figura 4.12 – Corpo de prova de coco 50mm



Figura 4.13 – Corpo de prova de sisal 50mm



Figura 4.14 – Corpo de prova de curauá 25mm



Figura 4.15 – Corpo de prova de sisal 50mm



Figura 4.16 – Exemplo de fibra segurando parte do solo



Figura 4.17 – Contenção de fissura pela fibra de coco



Figura 4.18 – Padrão de rompimento do corpo de prova de solo puro

O modo de ruptura foi claramente modificado pela inclusão das fibras. No corpo de prova feito com solo puro houve um surgimento bem definido de um plano de ruptura, enquanto nos compósitos formados com fibras os planos de ruptura não foram tão explícitos, as fibras foram capazes de segurar parte do material descolado da matriz de solo. Ple (2009) verificou que a propagação de fibra realmente é diminuída pela presença das fibras, evitando o aparecimento de uma banda de cisalhamento e aumentando a capacidade da argila de suportar

carga ou sobrecarga.

Assim como o observado por Donato (2004), foi constatada uma mudança significativa no modo de ruptura do corpo de prova. Enquanto a matriz de solo puro apresentou comportamento frágil, as reforçadas com fibra apresentaram um comportamento dúctil, com uma fragilidade muito menos anunciada. Tal fato fica explícito no gráfico a seguir, onde existe uma clara queda na curva de solo puro, enquanto nas outras o pico é mantido e até mesmo levemente elevado.

Vários autores relataram que a adição de fibras reduz a queda da resistência pós-pico, sendo essa uma característica importante no resultado da inclusão das fibras. Santiago (2011) e Casagrande e Consoli (2002) ainda observaram um crescimento constante da resistência com aumento da deformação axial, caracterizando um comportamento elastoplástico de enrijecimento. Algumas fibras deste trabalho apresentaram resultado semelhante, perceptível principalmente nas fibras de 50 mm, onde houve ganho de resistência com a deformação axial.

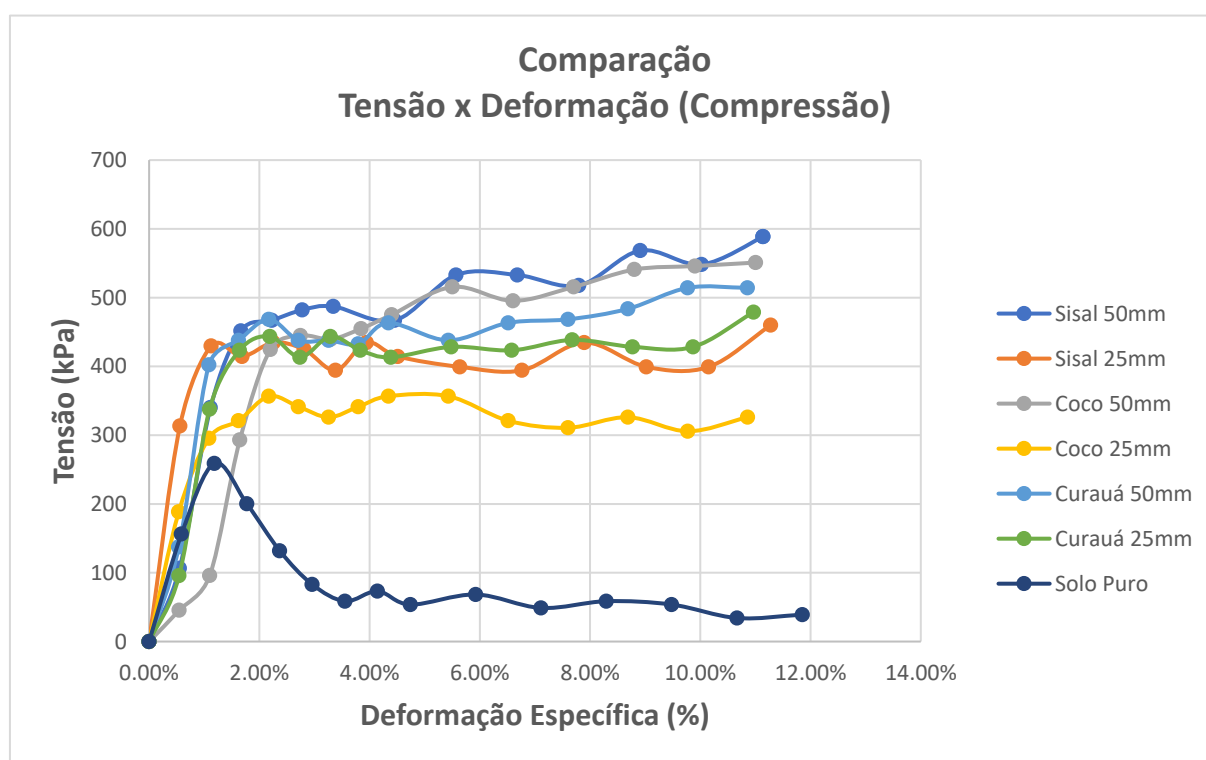


Figura 4.19 – Curva de tensão x deformação geral

Tabela 4.3 Comparativos do início do escoamento dos compósitos

COMPÓSITO	TENSÃO ESCOAMENTO (kPa)
Solo Puro	260
Sisal 50mm	460
Sisal 25mm	430
Coco 50mm	445
Coco 25mm	321
Curauá 50mm	450
Curauá 25mm	450

4.4 Investigação da degradação das fibras submetidas ao envelhecimento natural

Os corpos expostos apresentaram certo desgaste após os três meses de exposição, perdendo a estrutura bem uniforme que o corpo de prova apresenta logo após ser moldado. Algumas das fibras se mostraram expostas no momento da retirada dos corpos expostos do molde, como pode ser visto nas fotos a seguir.

Apesar desse nível de desgaste, os corpos ainda mantiveram sua estrutura cilíndrica, com a maioria das fibras ainda inseridas no meio do compósito, garantindo que o estudo feito em seguida se mantivesse válido.

Os dias em que ocorreu a exposição dos corpos se alternaram entre dias chuvosos e de sol intenso. Essa alternância entre secagem (dias de sol) e molhagem (dias de chuva) foi de suma importância para que as fibras degradem em um ambiente similar ao real, onde não há controle direto da umidade no solo.

Especialmente no dia da retirada os compósitos se mostraram bem úmidos, com sua dureza bem diminuída, mas ainda com o formato cilíndrico original. Isso ocorreu devido às chuvas intensas nos dias anteriores.

Silveira (2018) aponta que o ataque por parte de fungos e bactérias presentes no solo é apontado como responsável pelo processo de biodegradação das fibras resultando em uma rápida deterioração. A composição química das fibras, em específico o teor de lignina, é apontada como a primeira variável na determinação das taxas de degradação das fibras. Porém, a própria autora cita que tanto sisal quanto curauá estudadas apresentam composição química muito semelhante, ou seja, mesmos teores de celulose e de lignina, não justificando a diferença de perda das propriedades mecânicas observada nos compósitos reforçados com as duas fibras.



Figura 4.20 – Corpos de prova no local de exposição



Figura 4.21 – Detalhe da exposição do corpo de sisal



Figura 4.22 – Um dos corpos expostos com fibra de curauá

4.4.1 Fibras de sisal

As fibras de sisal se mostraram resistentes ao efeito do tempo e da degradação. A curva de tensão e deformação, tanto das fibras de 50mm quanto da de 25mm, apresentaram uma pequena redução da tensão suportada para um mesmo nível de deformação, nada muito destoante do ensaio sem degradação.

As fibras mesmo degradadas ainda possuem grande valor para o melhoramento do comportamento mecânico do compósito, com patamar de escoamento significativamente mais elevado do que o solo puro.

A ductilidade do material também se manteve, mantendo um patamar sem queda durante todo o processo do ensaio.

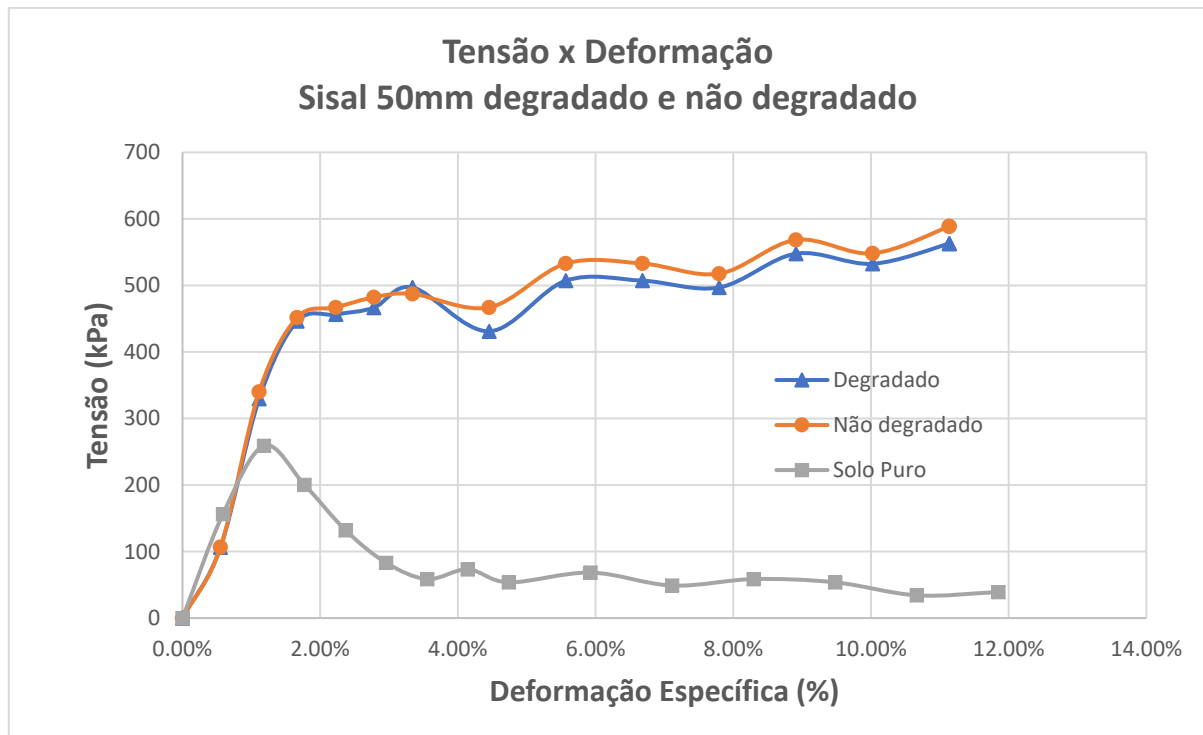


Figura 4.23 – Comparação das fibras de sisal 50mm

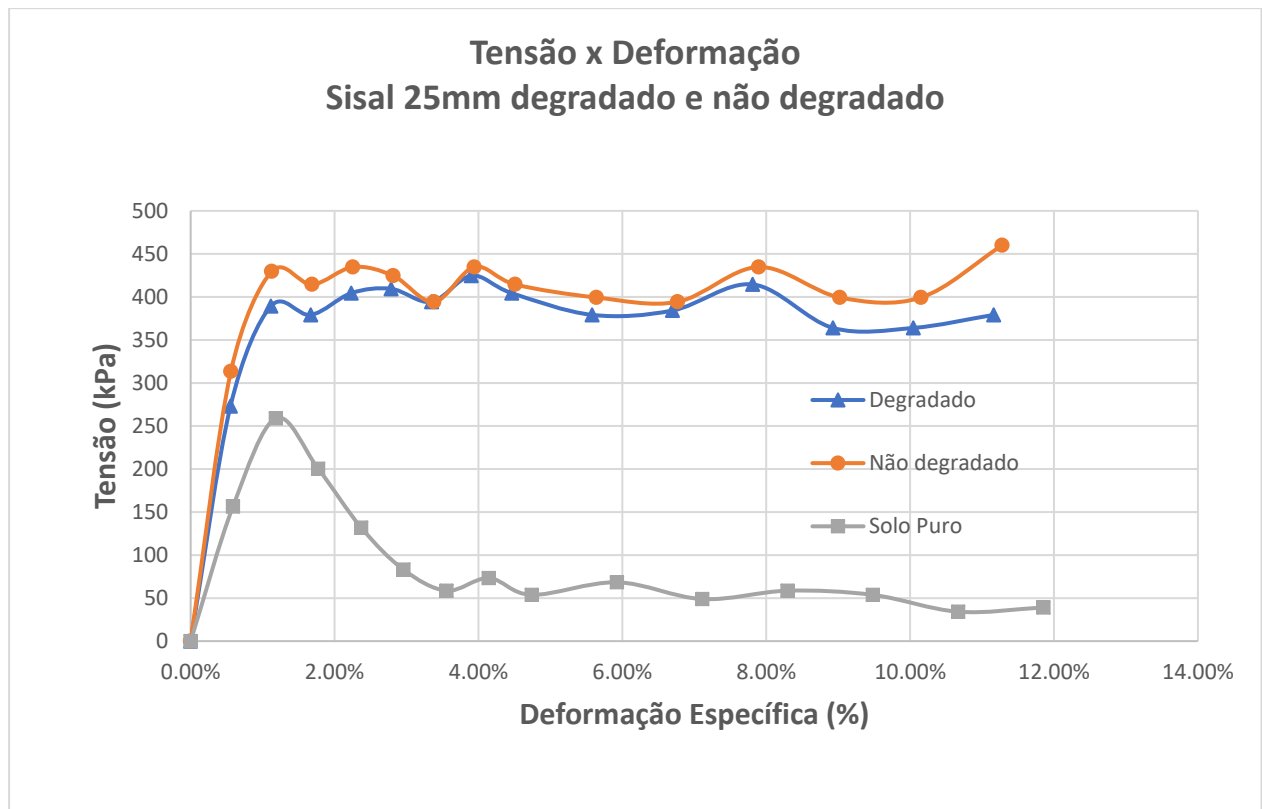


Figura 4.24 – Comparação das fibras de sisal 25mm

4.4.2 Fibras de coco

Das fibras estudadas o coco se mostrou a mais resistente ao processo de degradação, com até mesmo uma elevação da tensão suportada para mesma deformação.

O coco é conhecidamente um fruto do litoral, tendo casos registrados de frutos percorrendo distâncias no mar sem sofrer qualquer dano. Isso pode demonstrar que esse fruto tem grande capacidade de sobreviver em ambientes com variação de umidade sem perder suas capacidades mecânicas mais importantes para esse estudo.

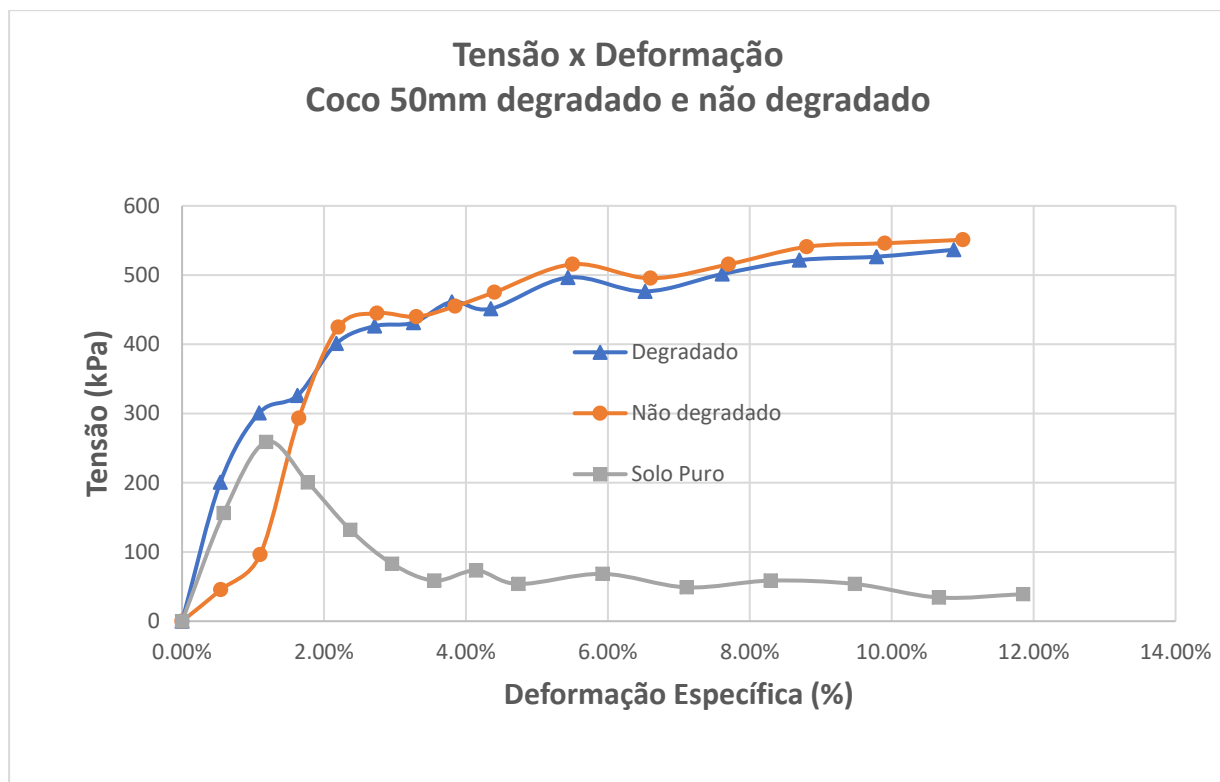


Figura 4.25 – Comparação das fibras de coco 50mm

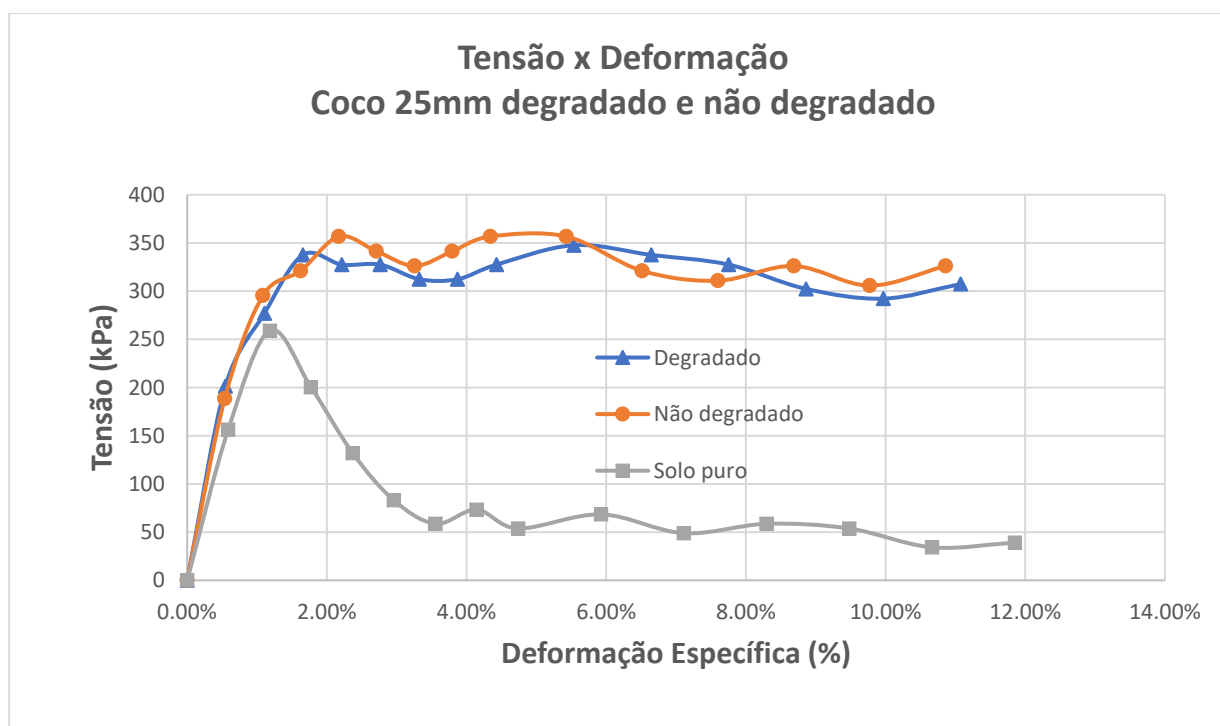


Figura 4.26 – Comparação das fibras de coco 25mm

4.4.3 Fibras de curauá

As fibras de curauá se mostraram bem suscetíveis ao envelhecimento natural no compósito. Ao contrário das fibras de sisal e coco, as de curauá mostraram uma queda na tensão suportada para a mesma deformação.

Silveira (2018) realizou a comparação da degradação entre sisal e curauá em compósito arenoso. Seu estudo chegou à conclusão que a fibra de curauá realmente apresenta nível de degradação mais acentuado, com fibras de 25mm tendo praticamente sumido após oito meses de exposição. Mesmo os corpos tendo sido expostos nesse trabalho menos da metade do tempo exposto pela autora ainda foi possível notar a perda de capacidade da fibra.

Ainda segundo Silveira (2018), a maior susceptibilidade a degradação em ambientes naturais das fibras de curauá poderia ser explicada pelo menor diâmetro das fibras, o que aumenta sua superfície específica, proporcionando um maior ataque microbiológico. Assim, a explicação utilizada para justificar o melhor comportamento mecânico da areia reforçada com fibra de curauá no tempo zero (de controle) seria a mesma para justificar sua rápida deterioração.

O curauá também apresenta uma grande absorção de água se comparada com as demais fibras. quanto maior a capacidade de absorção de água da fibra, maior é a sua susceptibilidade a este tipo de ataque.

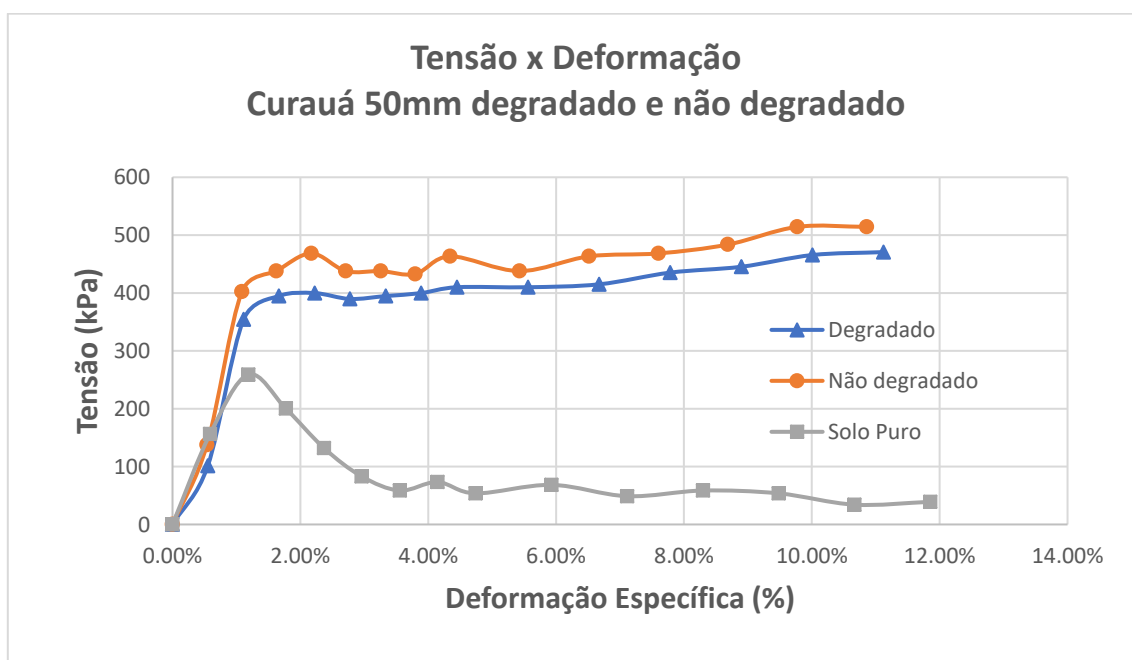


Figura 4.27 – Comparação das fibras de curauá 50mm

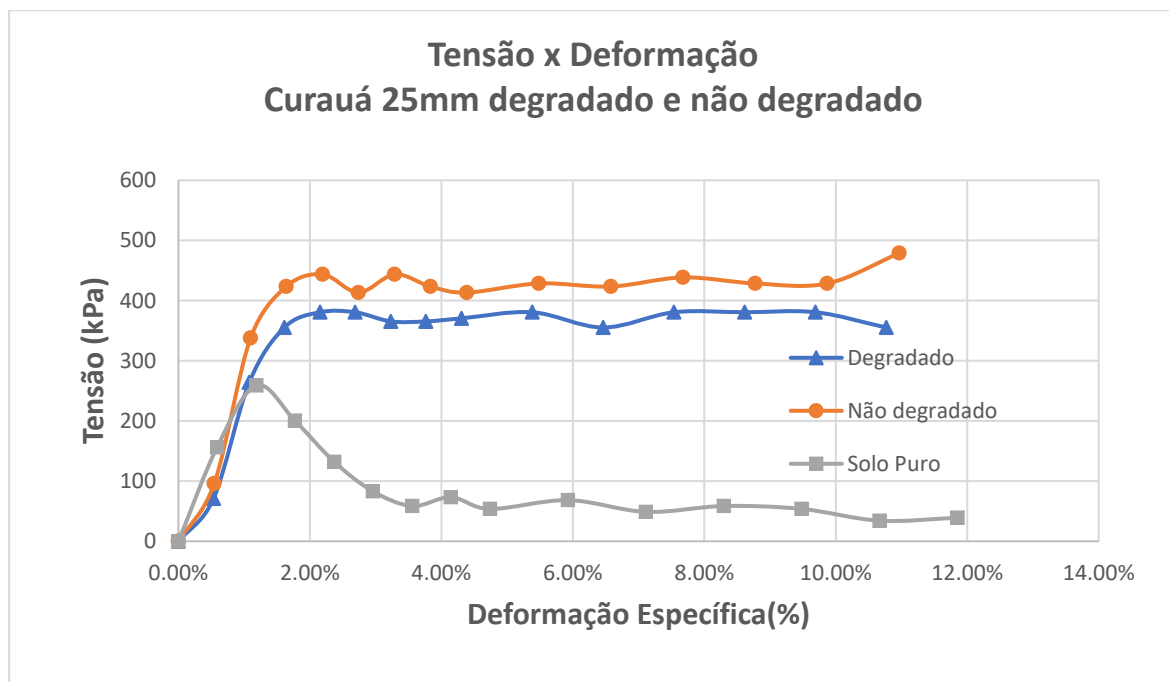


Figura 4.28 – Comparação das fibras de curauá 25mm

4.5 Ensaio de compressão simples complementar, com corpo de prova com altura inferior

Como teste inicial para uso da prensa de compressão foi moldado um corpo de prova de sisal 50mm de altura inferior, 63,32 mm, e realizado o ensaio. compressão. Esse valor de altura do corpo de prova se encontra fora dos limites de norma, que estabelece que a altura deve ser pelo menos duas vezes maior que o diâmetro.

Contudo, a título de curiosidade, os dados colhidos são expostos no gráfico seguinte. Os resultados se mostram semelhantes ao de sisal 50mm moldado na altura correta. O modo de ruptura não se apresenta frágil, a ductilidade do material aumentou significativamente e, ainda, o houve um crescente ganho na resistência apresentada no material ao final da curva.

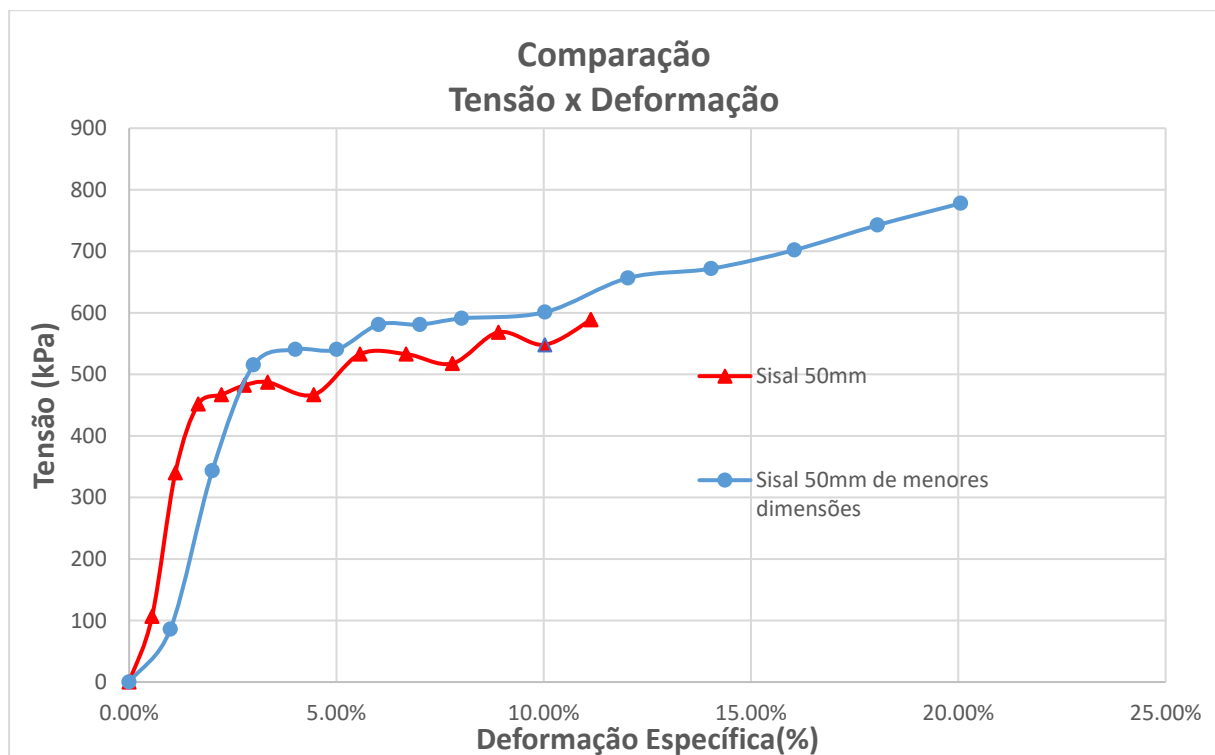


Figura 4.29 – Comparação das fibras de sisal 50mm, de alturas diferentes



Figura 4.30 – Corpo de sisal 50mm após ensaio finalizado



Figura 4.31 – Corpo de sisal 50mm após ensaio



Figura 4.32 – Corpo de sisal 50mm após ensaio realizado

Apesar da aparência rompida, o corpo de prova ainda seria capaz de receber carga antes do completo rompimento. Este fato pode ser observado diretamente pela análise do gráfico referente. O nível de tensão necessário para esse rompimento não foi atingido devido às limitações impostas pela prensa utilizada em modo CBR, que restringe o ensaio há um tempo de 10 minutos e deformação de 1270 c.mm.

5 CONCLUSÕES

Segundo os resultados apresentados e analisados nos capítulos anteriores, serão apresentadas as conclusões às quais se chegou, neste capítulo final. Vale lembrar que algumas delas já foram, de algum modo, mencionadas no decorrer do presente trabalho.

A influência da adição de fibras naturais ao solo propicia o desenvolvimento de um novo material geotécnico com características próprias, o que pode ser observado pela melhora do comportamento do compósito.

Os resultados satisfazem o objetivo da dissertação, os compósitos de fibras naturais possuem qualidades adequadas para possíveis empregos tanto em coberturas de aterros sanitários como também em aterros de solos moles, fornecendo a diminuição das deformações excessivas ocasionadas nesses aterros. Devido ao resultado apresentado, o reforço com fibras seria viável também em proteção de encostas, muros de contenção e em obras que necessitem de um melhoramento no comportamento carga x recalque.

Com base nos resultados e avaliações realizadas podemos dizer que as fibras agregam um incremento significativo na resistência mecânica do solo, sugerindo, portanto que as fibras têm grande potencial para ser utilizada como reforço geotécnico de baixo custo e com aspectos ambientais corretos, uma vez que as fibras existem em abundância no Brasil.

5.1 Peso específico aparente seco máximo e umidade ótima

Todos os corpos ensaiados apresentaram redução no peso específico aparente seco máximo e aumento da umidade ótima. Esse comportamento se apresentou mais intenso nas fibras de 25mm do que nas de 50mm. Esse resultado condiz com o dito por AL-WAHAB & AL-QURNA (1995)

Quanto ao tipo de fibra, as de curauá sofreram mais do que as outras fibras estudadas, com maior variação dos parâmetros estudados em comparação ao solo seco.

5.2 Resistência ao cisalhamento de pico

As curvas de tensão e deformação demonstram o ganho de resistência do solo misturado com as fibras naturais. É possível observar mesmo com maiores solicitações de carga o compósito não perde o patamar de resistência, mostrando que as fibras têm grande influência no sistema.

A análise geral dos resultados indica que as fibras vegetais podem ser usadas em obras onde o caso crítico para a estabilização ou funcionalidade da obra é imediatamente após a construção, como uma estrada de acesso construído sobre argila mole saturada, onde a função primária de qualquer reforço é permitir que a estrada seja construída. Para estes casos as fibras vegetais podem ser usadas desde que conhecidas a variação temporal de seu comportamento mecânico e/ou um tratamento adequado for aplicado para melhorar suas características.

5.3 Comprimento das fibras

Pela análise das curvas de tensão e deformação de uma fibra do mesmo tipo é possível concluir que o comprimento da fibra influencia diretamente no nível de melhoramento do compósito. As fibras de 50mm, por serem maiores, tem maior ancoramento na estrutura do solo, possibilitando o maior aporte de carga.

Com a presença das fibras de 50mm o compósito apresentou ainda um aumento da tensão suportada mesmo após o início da deformação acentuada, notado no crescimento da curva tensão versus deformação nos últimos estágios do carregamento avaliado.

Essa mobilização tardia de algumas fibras pode ser de grande valia em obras geotécnicas e não deve ser descartada.

5.4 Propagação de fissuras

A propagação de fissuras foi claramente contida por todos os compósitos, como foi demonstrado nas fotos deste estudo. Enquanto o solo puro apresenta fissuras bem definidas no processo de rompimento, os compósitos apresentaram fissuras de tamanho bem menor.

As fibras colocadas aleatoriamente trabalham sob o efeito de ancoragem, proporcionado pelas fibras ancoradas nos dois lados da superfície de cisalhamento, portanto, evitando esse desenvolvimento de fissuras, se consegue um acréscimo de resistência.

A aleatoriedade das fibras inseridas é importante para não propiciar um plano de ruptura bem definido e preferencial, como no caso do solo puro.

5.5 Modo de ruptura

O modo de ruptura se relaciona diretamente com a propagação de fissuras. A aleatoriedade das fibras inseridas é importante para não propiciar um plano de ruptura bem definido e preferencial, gerador de fissuras prematuras na estrutura, como no caso do solo puro. Sem um plano de ruptura bem desenhado, tendo as fibras impedido esse surgimento, o compósito fornece um acréscimo na resistência do sistema

A inserção das fibras faz com que o sistema mude de comportamento frágil do solo puro para um comportamento relevantemente mais dúctil, aceitando níveis de deformação sem que haja uma ruptura e perda da capacidade de resistência.

Com as fibras de 50mm se têm crescimento constante da resistência com aumento da deformação axial, caracterizando um comportamento elastoplástico de enrijecimento notável, mudando completamente o tipo de ruptura apresentado pelo solo puro.

5.6 Degradação das fibras

As fibras demonstraram ser suscetíveis à degradação natural ao tempo de 3 meses. Porém esse efeito não descarta primariamente seu uso em compósitos, tendo em vista que os ganhos em comparação ao solo puro ainda são significativos. Tanto aumento da ductilidade, contenção de fissuras e aumento da resistência ao cisalhamento de pico ocorrem com as fibras degradadas.

No entanto, para um uso completo e consciente do material em compósitos argiloso deve-se investigar o comportamento das fibras em tempos maiores de degradação, onde estas podem apresentar perda de capacidade maiores do que o esperado.

Cuidado especial deve ser observado quanto às fibras de curauá, pois estas já possuem um nível de degradação considerável. Os resultados mostrados aqui e os apresentados por Silveira (2018) explicitam esse fator.

6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento de qualquer trabalho de pesquisa sempre se procura aprofundar um determinado assunto, buscando respostas para todas as dúvidas geradas e lacunas abertas. Porém, durante esse processo, a percepção que se tem do problema se modifica e se revelam novas alternativas que até então não haviam surgido. Muitas possibilidades acabam sendo deixadas para trás por não terem sido contempladas no cronograma inicial, por motivos de falha ou pela falta de tempo.

Em virtude disso, algumas sugestões para a ampliação do conhecimento e o prosseguimento dos estudos sobre o reforço de solos com fibras em trabalhos futuros são citados a seguir:

- Estudo de compressão com maior teor de fibra (0,75%) visando comparar se o ganho máximo de resistência e contenção de fissuras se aplica já ao estudado nesse trabalho ou se outros teores podem melhorar ainda mais um compósito argiloso;
- Estudo de viabilidade econômica e técnica na execução de compósitos reforçado com fibras, com intuito de demonstrar que a esse tipo de reforço é plenamente viável na construção civil, podendo trazer até mesmo benefícios econômicos;
- Estudar o comportamento das fibras deste trabalho submetidas ao desgaste natural em compósitos argiloso por tempo maior, com o objetivo de comparar com a durabilidade das mesmas em compósitos de areia;
- Desenvolver modelos de análise numérica, possivelmente utilizando método dos elementos finitos, para reproduzir o comportamento de compósito de solos reforçado com fibras, de fundamental importância em obras geotécnicas;
- Realizar ensaios com outros tipos de fibras naturais, visando expandir as possibilidades desse tipo tecnologia em obras de geotecnia;
- Realizar ensaios com fibras tratadas para estudar o comportamento deste tratamento em compósitos argilosos.

Referências

- AL-WAHAB, R.; AL-QURNA, H. Fiber reinforced cohesive soils for application in compacted earth structures. In: *Proceedings of the GEOSSYNTHETICS'95 CONFERENCE*. [S.l.: s.n.], 1995. p. 433–466.
- BUDINSKI. *Engineering materials, properties and selection*. 5. ed. New Jersey: Prentice Hall International, 1996.
- BUENO, B. Soil fiber reinforcement: basic understanding. In: *International Symposium on Environmental Geotechnology*. [S.l.: s.n.], 1996. p. 878–884.
- CASAGRANDE, M. *Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da UFRGS., Porto Alegre, 2001.
- CASAGRANDE, M. *Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.
- CASAGRANDE, M.; CONSOLI, N. Estudo do comportamento de um solo residual arenosiltoso reforçado com fibras de polipropileno. In: *Solos e Rochas: Revista Latino-Americana de Geotecnia*,. [S.l.: s.n.], 2002. p. 223–230.
- CONSOLI, N.; CASAGRANDE, M.; COOP, M. Performance of a fibre-reinforced sand at large shear strains. In: *Géotechnique, Thomas Telford Ltd*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 751–756.
- CONSOLI, N.; PRIETTO, P.; ULBRICH, L. The behavior of a fiber-reinforced cemented soil. In: *Ground Improvement*. [S.l.: s.n.], 1999. p. 21–30.
- CURCIO, D. *Comportamento hidromecânico de compósito solo-fibra*. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFRJ, 2008.
- DIAB, A. *Effect of compaction method on the undrained strength of fiber-reinforced clay*. [S.l.], 2018.
- DONATO, M. *Fibras de polipropileno como reforço para materiais geotécnicos*. [S.l.], 2004.
- EMBRAPA. *Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Beneficiamento da casca de coco verde*. 2012.
- ENDO, T.; TSURUTA, T. *The effect of tree roots upon the shearing strength of soil*. [S.l.], 1969.
- FAO. *FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS Agriculture Database*. 2004.
- FESTUGATO, L. *Análise do comportamento mecânico de um solo micro-reforçado com fibras de distintos índices aspecto*. Dissertação (Mestrado) — UFRGS, Porto Alegre, 2008.

- FEUERHARMEL, M. *Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS., 2000.
- FIDELIS, M. *Desenvolvimento e caracterização mecânica de compósitos cimentícios têxteis reforçados com fibras de juta*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil,, 2014.
- GIRARDELLO, V. *Ensaio de placa em areias não saturadas reforçada com fibras*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia, 2010.
- GRAY, D.; OHASHI, H. Mechanics of fiber reinforcement in sand. In: *Journal of Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineers*. [S.l.: s.n.], 1983. p. 335–353.
- GRAY, D.; OHASHI, H. *Mechanics of fiber reinforcement in sand*. *Journal of Geotechnical Engineering*. 1989.
- HEINECK, K. *Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras impermeáveis horizontais*. Tese (Doutorado) — PPGE/UFRGS, 2002.
- HEJAZI, S. *A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers*. [S.l.]: Construction and building material, ELsevier, 2012.
- HOARE, D. Laboratory study of granular soils reinforced with randomly oriented discrete fibers. In: *Proceedings of the International Conference on Soil Reinforcement*. [S.l.: s.n.], 1997. p. 47–52.
- IMPE, W. V. *Soil improvement techniques and their evolution*. 1989.
- JOHNSTON, C. Advances in concrete technology. In: *Ottawa: National Resources Canada) Fiber-Reinforced Cement and Concrete*. [S.l.: s.n.], 1994.
- KAUL, R. *The influence of roots on certain mechanical properties of an uncompacted soil*. Tese (Doutorado) — University of North Carolina, 1965.
- LEOCADIO, G. *Reforço de solo laterítico com fibras de sisal de distribuição aleatória, tratadas superficialmente com EPS reciclado*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Ouro Preto, 2005.
- MAHER, M.; GRAY, D. *tatic response of sands reinforced with randomly distributed fibers*. [S.l.]: Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1983.
- MAHER, M.; HO, Y. *Mechanical properties of kaolinite/fiber soil composite*. *Journal of Geotechnical Engineering*. [S.l.], 1994.
- MARTINS, A. *Desenvolvimento, caracterização mecânica e durabilidade de compósitos solo-cimento autoadensáveis reforçados com fibras de sisal*. Tese (Doutorado) — UFRJ/COPPE., 2014.

- MCGOWN, A.; ANDRAWES, K.; MERCER, F. Soil strengthening using randomly distributed mesh elements. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING*. [S.l.: s.n.], 1988.
- MIRZABABAEI, M. Unconfined compression strength of reinforced clays with carpet waste fibers. In: *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 483–493.
- NATARAJ, M. Strength and deformation characteristics of fiber reinforced soils. In: *International Symposium on Environmental Geotechnology*. [S.l.: s.n.], 1996. p. 826–835.
- OLIVEIRA, A. *Avaliação de desempenho de fibras lignocelulósicas na sorção de óleos diesel e biodiesel*. Tese (Doutorado), 2010.
- PESSOA, F. *Análises dos solos de Urucu para fins de uso rodoviário*. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Tecnologia - Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2004.
- PINTO, M. *Fibras de curauá e sisal como reforço em matrizes de solo*. Dissertação (Mestrado) — Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2007.
- PLE, O. mechanical approach for fibre-reinforced clay in landfill caps cover application. In: *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 53–69.
- SANTIAGO, A. *Estudo do Comportamento Mecânico de Compósitos Solo-Fibras Vegetais Impermeabilizadas com Solução de Poliestireno Expandido (EPS) e Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas, 2011.
- SHEWBRIDGE, S.; SITAR, N. Deformation-based model for reinforced sand. In: *Journal of geotechnical engineering, American Society of Civil Engineers*. [S.l.: s.n.], 1990. p. 1153–1170.
- SILVA, F. *Durabilidade e Propriedades Mecânicas de Compósitos Cimentícios Reforçados por Fibras de Sisal*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- SILVEIRA, M. *Análise do Comportamento Mecânico e da Durabilidade em Compósitos de Areia Reforçada com Fibras Naturais de Curauá e Sisal*. Dissertação (Doutorado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.
- SOTOMAYOR, J. *Avaliação do comportamento carga-recalque de uma areia reforçada com fibra de coco submetida a ensaios de placa em verdadeira grandeza*. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.
- STAUFFER, S.; HOLTZ, R. Stress-strain and strength behavior of staple fiber and continuous filament-reinforced sand. In: *Transportation research record*. [S.l.: s.n.], 1995. p. 1474.

TAYLOR, G. Materials in construction. In: *Longman Scientific and Technical*. [S.l.: s.n.], 1994.

TEODORO, J. *Resistência ao cisalhamento de solos reforçados com fibras plásticas*. Dissertação (Mestrado) — Escola de São Carlos/ USP, 1999.

TOLEDO, R. *Materiais Compósitos Reforçados com Fibras Naturais: Caracterização Experimental*. Tese (Doutorado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1997.

TOLEDO, R. *Materiais compósitos reforçados com fibras naturais: caracterização experimental*. Tese (Doutorado) — Departamento de Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1997.

TOMZACK, F. *Estudo Sobre a Estrutura e Propriedades de Fibras de Coco e Curauá do Brasil*. Tese (Doutorado) — UFPR, 2010.

ULRICH, L. *Aspectos do comportamento mecânico de um solo reforçado com fibras*. Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS., 1997.

VENDRUSCOLO, M. *Comportamento de ensaios de placa em camadas de solo melhoradas com cimento e fibras de polipropileno*. Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, 2003.

VIDAL, H. *The principle of reinforced earth*. [S.l.], 1969.

